



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

NUEVAS TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN DE TALUDES APLICABLES A LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA EN CATALUÑA

Trabajo realizado por:

Isabel Romeral Muñoz

Dirigido por:

Ignacio Valero López

Máster en:

Ingeniería de Minas y Terreno

Barcelona, 30/09/2019

Departamento de Ingeniería del Terreno

TRABAJO FINAL DE MASTER

RESUMEN

La infraestructura ferroviaria en Cataluña posee algunas deficiencias que inciden en el correcto funcionamiento del sistema de transporte público. Uno de los factores que afecta al servicio consiste en el riesgo provocado por la inestabilidad de los taludes colindantes a la superestructura.

El objetivo del presente proyecto consiste en proponer una nueva metodología de monitorización de taludes que garantice la seguridad de la infraestructura y que resulte eficiente tanto técnica como económicamente.

El primer paso para la consecución de este objetivo ha sido analizar los factores que influyen en la estabilidad de taludes, las diferentes patologías que pueden surgir en consecuencia, formas de identificarlas y de clasificar los taludes en función a la calidad del macizo.

Seguidamente, se ha realizado un estudio de los métodos de predicción de inestabilidades y de las técnicas existentes de monitorización de taludes. Este estudio incluye tanto los métodos clásicos de instrumentación de taludes, como las nuevas técnicas de teledetección y monitorización remota mediante sensores.

Con el fin de seleccionar la metodología más eficiente, se ha analizado el escenario geológico y geotécnico en Cataluña y se han seleccionado dos líneas ferroviarias para realizar un estudio de viabilidad. Un primer análisis ha permitido acotar el estudio a las técnicas de fotogrametría, láser scanner y monitorización remota mediante sensores, debido a su viabilidad técnica de aplicación para el caso de estudio.

Finalmente, el análisis económico de estas metodologías ha demostrado que la técnica láser scanner, en su variante Train-borne LiDAR, resulta la más eficiente, tanto técnica como económicamente, para el desarrollo de un sistema de monitorización de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria en Cataluña.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.....	6
2. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	7
3. CONSIDERACIONES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	8
3.1. Factores condicionantes	9
3.1.1. Estratigrafía y litología.....	9
3.1.2. Estructura geológica y discontinuidades.....	10
3.1.3. Condiciones hidrogeológicas	11
3.1.4. Propiedades geomecánicas del terreno.....	13
3.1.5. Tensiones naturales.....	13
3.2. Factores desencadenantes	14
3.2.1. Cargas dinámicas y estáticas	14
3.2.2. Factores climáticos	15
4. MECANISMOS DE ROTURA EN TALUDES	17
4.1. Taludes en suelos o mixtos.....	17
4.2. Taludes en roca.....	19
4.2.1. Rotura planar	20
4.2.2. Rotura en cuña.....	23
4.2.3. Rotura circular.....	26
4.2.4. Rotura por vuelco ("toppling")	26
4.2.5. Rotura por flexión.....	32
5. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS	33
5.1. Clasificación RMR de Bieniawski	33
5.1.1. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta	33
5.1.2. Calidad del testigo RQD.....	34
5.1.3. Espaciado entre juntas o discontinuidades.....	34
5.1.4. Características de las discontinuidades.....	35
5.1.5. Condiciones hidrogeológicas	35
5.1.6. Corrección por la orientación de las discontinuidades.....	35
5.1.7. Clasificación de taludes en función del RMR.....	36
5.2. Clasificación SMR	36
6. PREDICCIÓN DE INESTABILIDADES	39
6.1. Métodos basados en la observación de movimientos.....	39
6.2. Métodos basados en la observación de las presiones intersticiales.....	39
6.3. Métodos empíricos indirectos.....	39
6.4. Métodos probabilísticos.....	39
7. AUSCULTACIÓN DE TALUDES.....	40

7.1.	Movimientos de apertura de grietas y entre bloques	41
7.2.	Movimientos en superficie.....	42
7.2.1.	Topografía convencional	43
7.2.2.	Sistema GPS.....	44
7.2.3.	Inclinómetro biaxial.....	46
7.3.	Desplazamientos profundos.....	46
7.3.1.	Inclinómetros	47
7.3.2.	Extensómetros.....	51
7.3.3.	Tiras de cortante.....	55
7.3.4.	Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)	56
7.4.	Medida de presiones intersticiales	57
7.4.1.	Tubería piezométrica ranurada	57
7.4.2.	Piezómetro de cabeza abierta.....	57
7.4.3.	Piezómetro cerrado	58
7.4.4.	Piezómetro-Lápiz.....	59
7.5.	Medida de presiones	60
7.5.1.	Ensayo de presiometría.....	60
7.5.2.	Células de presión total.....	60
7.5.3.	Células de carga.....	61
7.5.4.	Células de inclusión rígidas (CIR)	62
8.	MÉTODOS DE MONITORIZACIÓN MEDIANTE SENSORES	63
9.	MEDIOS FÍSICOS DE TRANSMISIÓN DE DATOS.....	68
9.1.	Medios de transmisión guiados.....	68
9.2.	Medios de transmisión no guiados.....	70
10.	SISTEMAS DE DETECCIÓN REMOTA	74
10.1.	Teledetección Radar.....	74
10.1.1.	Interferometría SAR convencional (InSAR).....	75
10.1.2.	Interferometría Diferencial Avanzada (A-DInSAR)	77
10.1.3.	Ground-based SAR (GB-SAR)	78
10.1.4.	Aplicaciones	80
10.2.	Láser scanner (LiDAR)	81
10.2.1.	LiDAR terrestre.....	82
10.2.2.	LiDAR sobre plataforma móvil.....	83
10.2.3.	Aplicaciones	85
10.3.	Fotogrametría	88
10.3.2.	Structure from Motion (SfM)	89
10.3.3.	Aplicaciones	90
10.4.	SEGUIMIENTO MEDIANTE DRONES.....	91
11.	ANÁLISIS DE RIESGOS	92

12. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE APLICACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE CATALUÑA	94
12.1. Área de estudio.....	95
12.2. Principales problemas geotécnicos	101
12.3. Ventajas y limitaciones de los medios de monitorización existentes.....	103
12.3.1. Sistemas de Teledetección	105
12.3.2. Sensores in situ	108
12.4. Análisis económico de los diferentes métodos	110
12.4.1. Comparativa económica de técnicas de teledetección	111
12.4.2. Sensores instalados in situ	115
12.4.3. Análisis de los resultados	117
13. CONCLUSIONES	118
14. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
OTRAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	125

1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

La sociedad actual se encuentra generalmente centralizada en los núcleos de las grandes ciudades, donde se desarrolla gran parte de las actividades tanto sociales como económicas.

El aumento del ritmo de crecimiento de la población mundial, junto con la subida del precio de la vivienda en las grandes ciudades, producto de la centralización previamente mencionada, ha provocado que un alto porcentaje de la población se vea obligada a vivir a grandes distancias del núcleo urbano principal, donde mantienen sus puestos de trabajo o zonas de ocio.

Este hecho es origen de diversos problemas debido a la enorme cantidad de personas que se desplazan diariamente desde la periferia al centro de las ciudades por medio de vehículos propios, tales como la formación de colapsos en las entradas y las salidas de las ciudades, la falta de espacio de aparcamiento, el aumento del nivel de contaminación y muchas otras situaciones que acarrearán consecuencias muy negativas a la población como pueden ser el estrés de los conductores, el aumento de los precios de las plazas de aparcamientos, los obvios efectos adversos de la contaminación, en definitiva, una disminución general de la calidad de vida de los ciudadanos.

Una forma de luchar contra este problema es motivar a la población al uso del transporte público, en este caso el transporte ferroviario. Sin embargo, para disuadir a las personas del uso del vehículo particular, es indispensable ofrecer un servicio seguro, eficiente y de calidad del transporte público.

Barcelona es un claro ejemplo de este tema que se está tratando, una ciudad congestionada por el tráfico con una infraestructura ferroviaria objeto de quejas y falta de confianza por parte de los usuarios.

El principal origen de las deficiencias de la infraestructura ferroviaria en Cataluña es que se trata de un sistema anticuado, en el que la falta de inversión y modernización la ha convertido en una infraestructura vulnerable a las diversas dificultades que puedan surgir.

Por otro lado, la infraestructura ferroviaria en Cataluña atraviesa una orogenia compleja con una geología muy variada, lo que añade un grado de dificultad a los esfuerzos por mantener un servicio seguro y eficiente. Por ejemplo, en algunas líneas que atraviesan zonas montañosas formadas por complejos sistemas geológicos, como pueden ser la zona de La Pobla o Manresa, la inestabilidad de taludes provoca la necesidad de establecer tramos de reducción obligatoria de velocidad, con el objetivo de que el maquinista disponga de tiempo de reacción en caso de que algún desprendimiento haya invadido la vía y pueda provocar un accidente.

Este hecho y otros ponen en evidencia la eficacia del sistema de control de taludes, ya que las inestabilidades representan un riesgo a la seguridad de la infraestructura ferroviaria y un motivo de deficiencias en su funcionamiento.

La metodología actual llevada a cabo para controlar la estabilidad de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria genera grandes costes sin ser completamente

eficiente o segura. Esta metodología consiste en la inspección visual, realizada por ingenieros, que deben recorrer las vías a pie, expuestos a un riesgo constante debido a la circulación de trenes.

Estas condiciones de trabajo limitan enormemente la ejecución de una correcta inspección de taludes ya que, en la mayoría de los casos, las condiciones de visibilidad del talud son muy limitadas y la posibilidad de realizar correctamente las mediciones necesarias para detectar posibles inestabilidades son prácticamente nulas sin poner en riesgo al trabajador que las realiza.

Esta situación puede provocar que los ingenieros puedan sobredimensionar las actuaciones de estabilización necesarias con el objetivo de mantenerse en el lado de la seguridad o cometer errores debido a la imposibilidad de detectar ciertas patologías que puedan poner en peligro la infraestructura.

Ambas situaciones suponen un gasto económico evitable mediante la aplicación de nuevas metodologías que aprovechen los avances tecnológicos existentes en el ámbito de monitorización y auscultación de taludes.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente proyecto consiste en proponer una metodología alternativa para la ejecución de la monitorización de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria en Cataluña. Se trata de determinar un método que resulte más eficiente tanto técnica como económicamente y que garantice la seguridad y el buen funcionamiento de la misma.

Para ello este trabajo se dividirá en tres etapas:

1. Estudio de los factores que intervienen en la estabilidad de taludes, posibles modos de rotura y su identificación.
2. Estudio de los métodos de predicción de inestabilidades y de las técnicas de auscultación e instrumentación existentes. Este estudio incluye tanto el análisis de las técnicas de instrumentación clásicas, como de las nuevas metodologías de teledetección, auscultación remota y seguimiento en tiempo real.
3. Análisis técnico y económico de las técnicas existentes, estudio de la viabilidad y posibilidad de implementación a la infraestructura ferroviaria en Cataluña.

3. CONSIDERACIONES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES

Las obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles) generalmente precisan de la excavación de taludes. Estos taludes son denominados desmontes, cuando dan lugar a un solo talud; o trincheras, si la excavación da lugar a un talud a cada lado.

En ingeniería civil, generalmente los taludes alcanzan alturas máximas de 40 o 50 m y se diseñan con la pendiente máxima, que permita la resistencia del terreno manteniendo condiciones de estabilidad aceptables.

Para determinar la estabilidad de un talud, es necesario conocer tanto los factores intrínsecos al terreno como los factores externos que influyen sobre el talud y que pueden desencadenar condiciones de inestabilidad.

Los factores intrínsecos del terreno natural, como son los geológicos, los hidrogeológicos y los geotécnicos, son considerados **factores condicionantes o pasivos**, ya que determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud [1].

- **Factor geológico y geotécnico:** la geometría estable de un talud está directamente relacionada con sus características geológicas y geotécnicas tales como la naturaleza del terreno, su resistencia, deformabilidad, homogeneidad, estratificación y permeabilidad. Estos factores condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud.
- **Factor hidrológico:** la presencia de agua puede desestabilizar el equilibrio natural de un talud debido a diferentes acciones:
 - Reducción de la resistencia del suelo ante efectos cortantes lo cual deriva en desprendimientos de bloques.
 - Erosión del talud debido a la circulación de agua.
 - Problemas en suelos susceptibles de heladas
- **Factor topográfico:** la situación de la infraestructura respecto al terreno natural, el tipo de sección transversal (altura e inclinación del talud) y la forma de transición de una sección a otra tienen gran importancia en la inestabilidad del talud y la vulnerabilidad de la infraestructura frente a ésta.

Los factores externos a la naturaleza del terreno, que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características, propiedades y condiciones de equilibrio, son denominados **factores desencadenantes o activos**. La combinación de ambos factores es lo que determina el equilibrio del talud, por lo que para un correcto estudio de estabilidad es imprescindible el conocimiento y análisis de todos ellos.

En la *Tabla 1* se resumen los factores que afectan la estabilidad de los taludes.

FACTORES CONDICIONANTES	<ul style="list-style-type: none"> · Estratigrafía y litología · Estructura geológica · Condiciones y comportamiento hidrogeológico de los materiales · Propiedades físicas, resistentes y deformacionales · Tensiones naturales y estado tenso-deformacional
FACTORES DESENCADENANTES	<ul style="list-style-type: none"> · Sobrecargas estáticas · Cargas dinámicas · Cambios en las condiciones hidrogeológicas · Factores climáticos · Variaciones en la geometría · Reducción de los parámetros resistentes

Tabla 1: Factores influyentes en la estabilidad de taludes. Fuente: Modificado de González de Vallejo, L. I., et. al., 2002.

3.1. Factores condicionantes

Los factores condicionantes son aquellos intrínsecos a la naturaleza del terreno y que condicionan su estabilidad. A continuación, se desarrollan cada uno de estos factores y su afección a la estabilidad de los taludes.

3.1.1. Estratigrafía y litología

La naturaleza de los materiales que forman un talud está directamente relacionada con el tipo de inestabilidades que pueden producirse en él. De la misma forma, el tipo de material que forma el talud condicionará la geometría estable del mismo en términos de altura e inclinación. Esta relación es debida a que cada litología tiene un diferente grado de riesgo ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas, debido a sus propiedades físicas, resistentes y de permeabilidad.

La alternancia de materiales de diferente litología, competencia y grado de alteración determinan los tipos y disposición de las superficies de rotura.

En los suelos, las diferencias en el grado de compactación, cementación o granulometría generan zonas de debilidad y de circulación de agua que pueden conducir a inestabilidades. De esta forma, los terrenos estratificados formados por capas duras y blandas o las arenas mezcladas con pequeñas cantidades de arcilla, son susceptibles de sufrir fenómenos de erosión diferencial y socavación, lo cual puede dar lugar a desprendimientos o colapsos. En este caso, las capas blandas deben tener un ángulo de talud menor que las zonas de estratos más duros.

Igualmente, en los macizos rocosos, la existencia de capas o estratos de diferente competencia implica un diferente grado de fracturación en los materiales. Por otro lado, la existencia de capas intermedias formadas por arcillas, son muy susceptibles a provocar planos de deslizamiento debido a su lubricación por el agua de lluvia (caso muy frecuente en taludes formados por pizarras).

3.1.2. Estructura geológica y discontinuidades

La combinación de los elementos estructurales con los parámetros geométricos del talud (altura, inclinación y orientación) controlan los problemas de inestabilidad que pueden producirse.

La distribución espacial de las discontinuidades presentes en un macizo rocoso, definen su estructura, ya que según esta distribución se produce la individualización de bloques de matriz rocosa que serán más o menos competentes según las características y propiedades resistentes de las discontinuidades.

Estas discontinuidades, tales como superficies de estratificación, diaclasas, fallas, grietas, etc., representan planos de debilidad en el macizo cuya estabilidad depende de su disposición y orientación respecto la superficie del talud. Si el buzamiento de estos planos está dirigido hacia el frente del talud, se producirán superficies de rotura y deslizamiento potenciales.

De esta forma, la presencia de discontinuidades implica un comportamiento anisótropo en el macizo y la existencia de planos de rotura preferentes. La dirección del movimiento y el tamaño de los bloques movilizados dependerá de la geometría del sistema de fracturas existentes. En función a la relación entre el tamaño del frente del talud y la red de discontinuidades, el comportamiento del talud quedará definido por una o varias macrodiscontinuidades o bien por varios sistemas de juntas y planos de debilidad, lo que condicionará el tipo y volumen de las inestabilidades.

Por otro lado, la estructura geológica también puede afectar al grado de estabilidad del talud debido a las modificaciones producidas durante la excavación, por ejemplo, en estructuras de tipo compresivo o distensivo. La existencia de esfuerzos tectónicos residuales puede inducir procesos desestabilizadores.

En taludes formados por rocas, hay que tener en cuenta que, si el buzamiento de los estratos coincide con el ángulo del talud, existirán riesgos de deslizamientos de lajas. Por otro lado, en rocas amorfas, es posible proyectar taludes totalmente verticales, sin embargo, esta práctica supone un riesgo considerable, ya que cualquier desprendimiento que se produzca afectará directamente a la infraestructura ferroviaria, por lo que sólo sería recomendable en aquellos casos en los que existe una gran distancia entre el talud y las vías, situación que no suele ocurrir en la realidad.

El ángulo estable de un talud está directamente relacionado con su ángulo de rozamiento interno y su grado de humedad. En la *Tabla 2* pueden observarse las inclinaciones que se consideran generalmente estables según la naturaleza del talud (desmante o terraplén) y los materiales que lo conforman.

TIPO DE TALUD	MATERIALES	GEOMETRÍA (H:V)
TALUDES EN DESMONTE	Granito	1:5
	Cuarcita y arenisca	1:4
	Pizarras y conglomerados	1:4 – 1:3
	Gravas y acarreos	1:1
	Tierra seca con arcilla	1:1 – 1,3:1
	Arcilla bien drenada	1,5:1 – 2,5:1
	Arcilla húmeda	2:1 – 4:1
TALUDES EN TERRAPLÉN/PEDRAPLÉN	Turba	2,5:1 – 5:1
	Pedraplén	1,25:1
	Terraplén	1,5:1

Tabla 2: *Inclinaciones de diseño para taludes en desmonte y terraplén/pedraplén para infraestructuras ferroviarias. Fuente: Norma N.R.V 2-1-3.0 “Normas técnicas de vía ADIF: Obras de Tierra-Estabilidad de taludes”.*

Los suelos y materiales para la formación de terraplenes y pedraplenes se seleccionan según las características que marca la Norma N.R.V. 2-1-0.0 “Normas técnicas de vía ADIF: Obras de Tierra-Calidad de la plataforma”. Los materiales destinados a la formación de la coronación son de características más estrictas que los utilizados para el núcleo y sus taludes podrían ser más verticales, aunque se construyen con la misma inclinación. Este ángulo dependerá del grado de compactación dado a los materiales, también fijados por la Norma.

3.1.3. Condiciones hidrogeológicas

La presencia de agua es una de las principales causas de roturas en taludes, debido a la variación de presiones intersticiales, arrastre de materiales y erosión superficial o interna. De esta forma, la presencia de agua en el talud provoca una disminución de la resistencia del terreno, aumentando las fuerzas desestabilizadoras.

Los principales efectos desestabilizadores producidos por la presencia de agua en los taludes son debidos a:

- Reducción de la tensión normal efectiva (σ'_n) en los planos de rotura, que provoca una disminución de la resistencia al corte (τ):

$$\tau = c + (\sigma_n - u) \tan \phi = c + \sigma'_n \tan \phi$$

Donde:

- c : Cohesión
 - σ_n : Tensión normal
 - σ'_n : Tensión normal efectiva
 - u : Presión intersticial
 - ϕ : Ángulo de rozamiento interno
- Aumento de la presión ejercida sobre las grietas de tracción existentes favoreciendo condiciones de deslizamiento.

- Aumento del peso específico del material (γ) debido a su saturación en agua:

$$\gamma = \gamma_d + S \cdot n \cdot \gamma_w$$

Donde:

- γ_d : Peso específico aparente seco
 - S : Grado de saturación
 - n : Porosidad
 - γ_w : Peso específico del agua
- Erosión interna debido a flujos subsuperficiales o subterráneos.
 - Meteorización y transformación de la composición mineralógica de los materiales.
 - Formación de nuevas discontinuidades debido a la congelación del agua en el interior del macizo en condiciones de bajas temperaturas debido a procesos de gelificación.

La forma de la superficie freática dentro del macizo rocoso depende de diversos factores como son la permeabilidad de los materiales, la geometría del talud y las condiciones de contorno.

En macizos rocosos, la estructura geológica de los materiales y la alternancia de materiales permeables e impermeables tiene una gran influencia en la geometría que adoptará la superficie freática y por tanto en la distribución de las presiones intersticiales sobre las potenciales superficies de deslizamiento.

Las variaciones estacionales y las condiciones pluviométricas pueden afectar al nivel de la superficie freática como consecuencia de largos periodos de lluvias o sequía. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que sólo una parte del agua de la lluvia o escorrentía consigue penetrar en el terreno, y una mínima parte llega a incorporarse al nivel freático, por lo que estas variaciones se producen de forma lenta y gradual. Como excepción, en el caso de materiales muy permeables, la ocurrencia de precipitaciones muy intensas y continuadas puede inducir un aumento relativamente rápido del nivel freático.

El flujo de escorrentía superficial también puede generar inestabilidades en el macizo debido al aumento de las presiones en el interior de discontinuidades, grietas y en la zona más superficial del terreno; o debido a la erosión y al lavado de materiales blandos o poco consistentes. De esta forma, las roturas en taludes formados por suelos naturales se producen más frecuentemente en épocas de precipitaciones abundantes o de deshielo.

El efecto más importante del agua sobre los taludes es debido a la presión que ésta ejerce sobre los materiales, que queda definida por la altura del nivel piezométrico. Para evaluar la magnitud y la distribución de estas presiones dentro del talud y los efectos del agua debe considerarse:

- Comportamiento hidrogeológico de los materiales, cuyos parámetros más importantes son: el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, el gradiente hidráulico y el coeficiente de almacenamiento.
- Presencia de niveles freáticos y piezométricos.
- Flujo de agua existente en el talud.

3.1.4. Propiedades geomecánicas del terreno

La rotura potencial de un talud a favor de una discontinuidad determinada depende de su resistencia al corte, la cual, depende a su vez de los parámetros resistentes de los materiales que la forman; estos son la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

La elección de los parámetros resistentes en los suelos debe realizarse teniendo en cuenta su historia geológica, de esta forma se tendrán en cuenta los parámetros pico o residuales, cuyas magnitudes pueden variar notablemente.

En el caso de los macizos rocosos, para analizar el comportamiento mecánico del talud deben tenerse en cuenta las características y estructura del macizo, la geometría de la red de fracturación y su naturaleza, y las características de los materiales que forman las discontinuidades. En función de estos parámetros, la resistencia del macizo dependerá de las propiedades de las discontinuidades, de la matriz rocosa o de ambas. Generalmente, el aspecto más importante para determinar la estabilidad del macizo rocoso es la resistencia al corte de los planos de debilidad existentes, que a su vez depende de su naturaleza y origen, continuidad y espaciado, tipo y espesor del relleno, presencia de agua, rugosidad, etc.

3.1.5. Tensiones naturales

Las tensiones naturales existentes en el macizo juegan también un papel importante en la estabilidad de los taludes, ya que la descompresión que se produce al realizar la excavación del talud puede suponer una importante liberación de tensiones y desencadenar movimientos o transformación del comportamiento de los materiales. En el caso de los macizos en roca, una descompresión de gran magnitud que puede provocar que el material rocoso se transforme, fragmentándose a través de las zonas de debilidad, pasando a comportarse como un suelo y pudiendo llegar al colapso.

El estado tensional del talud excavado estará directamente relacionado con su geometría y con el estado de tensiones original del macizo. En la *Figura 1* puede observarse cómo se redistribuyen las trayectorias de esfuerzos en un macizo debido a una excavación.

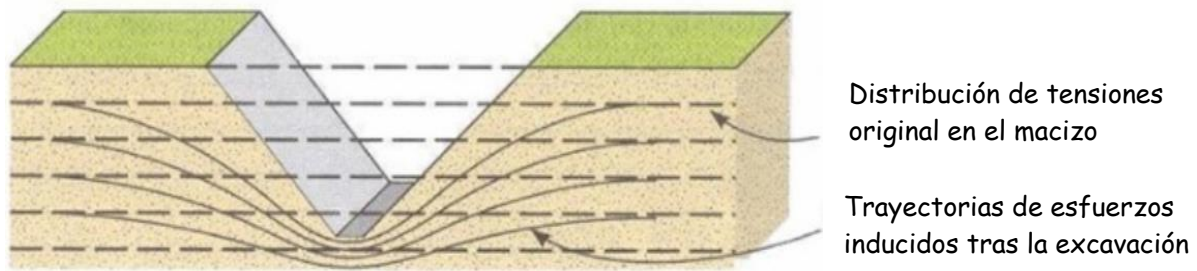


Figura 1: Modificación de las trayectorias de esfuerzos horizontales en un macizo debido a una excavación. Fuente: Modificado de González de Vallejo, L. I., et. al., 2002.

En excavaciones profundas, las mayores variaciones tensionales se producen en la cabecera y en el pie del talud. En el pie del talud se produce un gran aumento de la magnitud de las tensiones existentes que puede dar lugar a inestabilidades, mientras que en la cabecera se generan tensiones de tracción que dan lugar a un comportamiento anisótropo que puede propiciar la aparición de grietas verticales susceptibles a desencadenar movimientos en el talud.

En el caso de macizos sometido a esfuerzos tectónicos, las excavaciones generan una liberación y redistribución de las tensiones naturales lo que provoca la pérdida de resistencia de los materiales. De esta forma, las discontinuidades y las zonas compresivas, tales como los pliegues, pueden convertirse en zonas de debilidad debido a la presencia de tensiones distensivas o traccionales.

Consecuentemente, al analizar la estabilidad de los macizos rocosos es importante tener en cuenta su estado tenso-deformacional ya que puede afectar a su comportamiento y propiedades resistentes.

3.2. Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes son aquellas condiciones externas a la naturaleza del terreno, pero que influyen sobre su estabilidad. A continuación, se explican estos factores y cómo afectan al terreno modificando su estabilidad.

3.2.1. Cargas dinámicas y estáticas

Los taludes pueden estar sometidos a sobrecargas estáticas y cargas dinámicas, que modifican la distribución de fuerzas dentro del talud pudiendo generar inestabilidades.

Las **sobrecargas estáticas** ejercidas sobre la cabecera del talud pueden contribuir al aumento de las fuerzas desestabilizadoras disminuyendo el factor de seguridad del talud. Estas cargas pueden ser debidas a diversos factores, generalmente de origen antrópico como pueden ser el peso de estructuras, de edificios, de materiales de relleno, escombreras, paso de vehículos pesados, etc.

Las **cargas dinámicas** son principalmente ocasionadas por movimientos sísmicos, tanto naturales como de origen antrópico (infraestructuras ferroviarias, voladuras, maquinaria de obra civil, etc.). El principal efecto de estas cargas sobre los macizos rocosos es la apertura de discontinuidades preexistentes, lo que conlleva a una

disminución de su resistencia al corte y la individualización y caída de bloques de roca. En los casos en los que se producen cargas sísmicas de gran envergadura, debido a la rápida aplicación de fuerza sobre el talud, la existencia de condiciones previas favorables a la inestabilidad puede inducir una rotura general o colapso.

De esta forma, en el análisis de taludes en zonas sísmicas o que puedan estar sometidos a otras cargas dinámicas o estáticas deberán tenerse en cuenta estas fuerzas. El factor más relevante a considerar es el coeficiente de empuje en reposo (K_0), que relaciona la magnitud de los esfuerzos efectivos horizontales y verticales en el terreno:

$$K_0 = \sigma'_H / \sigma'_V$$

Algunos procesos geológicos como la erosión o los procesos neotectónicos pueden provocar variaciones de esta relación y generar inestabilidades. De esta forma, el control del valor de esta magnitud permitirá anticipar fallos o roturas asociadas a este tipo de procesos.

3.2.2. Factores climáticos

Tal y como se ha explicado, la presencia de agua es uno de los mayores condicionantes en la estabilidad de taludes, ya que produce la alteración de las características de los suelos modificando las condiciones de taludes que, en ausencia de agua, serían perfectamente estables. Los principales factores que afectan a los taludes son el agua de la lluvia y la humedad del ambiente ya que inciden directamente en el grado de humedad del suelo.

La alternancia de épocas de lluvia y sequía produce una variación en la estructura de los suelos, llevando generalmente a una pérdida de resistencia. Por ejemplo, en muchas formaciones de tipo arcilloso presentes en climas áridos o semiáridos, el material desecado se satura tras los periodos de lluvia pudiendo llegar a condiciones de rotura o inestabilidad. En estos casos es posible determinar criterios de riesgo de inestabilidad en función a la pluviometría mediante la contrastación de causas y efectos observados en diferentes casos.

Los procesos de meteorización también pueden ser una importante causa de reducción de las propiedades resistentes en algunos tipos de suelos o macizos rocosos, sobre todo, en aquellos en los que haya presencia de materiales blandos. Esto es debido a que las excavaciones realizadas para la ejecución de los taludes dejan al descubierto los materiales del interior del macizo y, consecuentemente quedan expuestos a procesos de alteración y degradación intensas. Esta pérdida de resistencia puede dar lugar a desprendimientos de material superficial y, en caso de afectar a zonas críticas del talud, como el pie o la cabecera, pueden inducir una rotura general de talud, sobre todo en presencia de agua.

El agua de lluvia, combinada con la acción erosiva del viento, provoca la erosión de la superficie de los taludes y el reblandecimiento de las capas blandas. Este proceso puede dar lugar a desprendimientos, formación de planos de deslizamiento debido al empape de capas arcillosas en el contacto con materiales más duros, deformación de

la base del talud debido a la disminución de la capacidad portante de las capas inferiores y otros procesos erosivos que afectan a la estabilidad de los taludes.

El estado de erosión de los taludes es muy importante ya que provoca la necesidad de limpiar las cunetas de la plataforma, incluso cuando está cubierta mediante tapas, con el fin de evitar encharcamientos que den lugar a futuros asientos.

La erosión debida a la escorrentía de agua sobre la superficie de los taludes suele ser debida a la inexistencia de cunetas de coronación de talud, un alejamiento excesivo de la misma cuneta del borde del talud o precipitaciones abundantes que actúen directamente sobre la superficie del talud. En el último caso, una forma de evitar el efecto erosivo de la lluvia es aplicar un revestimiento sobre la superficie del talud.

A contrario de lo que ocurre en los procesos erosivos provocados por el agua, los desprendimientos son una consecuencia que se manifiesta de forma brusca. Cuando el agua penetra en las fisuras de las rocas, ésta puede reblandecer el suelo cohesivo que las rellena (como es el caso de las pizarras) o las agrandarlas debido a procesos de gelifracción (como en caso de las cuarcitas). Estas variaciones en el estado tensional alrededor de la fractura pueden desestabilizar los bloques rocosos adyacentes provocando desprendimientos en el talud.

Por otro lado, en los taludes formados por estratos de diferente consistencia, la presencia de agua puede provocar la disolución de las capas blandas propiciando la caída de las capas superiores o a su colapso debido a la socavación de la base del talud.

De esta forma, la erosión de los taludes afecta a la circulación del agua a través del drenaje superficial, encharcando la plataforma y provocando asientos en ella a corto o largo plazo. Las medidas de remediación que pueden llevarse a cabo son:

- Sanear la parte de talud afectada y separar el talud de la vía.
- Mejora del sistema de drenaje.

4. MECANISMOS DE ROTURA EN TALUDES

Tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, la composición geológica de un talud afecta en gran medida al tipo de fallo que puede producirse. De esta forma, para el estudio de los diferentes mecanismos de rotura se distinguirá entre taludes formados por suelo, roca o una combinación de ambos materiales.

4.1. Taludes en suelos o mixtos

En los taludes formados exclusivamente por suelos o rocas blandas, el principal problema que puede ocasionar graves incidentes sobre la infraestructura ferroviarias es la formación de planos de deslizamiento que movilicen una masa considerable del talud sobre las vías. Estas roturas pueden producirse a favor de una superficie curva o plana.

En el caso de terrenos homogéneos o formados por estratos con propiedades resistentes homogéneas, la superficie de rotura toma una forma aproximadamente circular, por lo que el deslizamiento producido consiste en un movimiento con una fuerte componente rotacional. Existen diferentes tipologías de rotura en función de la localización del extremo inferior de la superficie de rotura, tal como puede observarse en la *Figura 2*. De esta forma, la rotura estrictamente circular puede clasificarse en tres tipologías:

- **Rotura profunda o de base:** el extremo inferior de la superficie de rotura se encuentra por debajo del pie del talud.
- **Rotura al pie del talud:** el extremo inferior de la superficie de rotura se encuentra en el pie del talud.
- **Rotura local o de cabecera:** el extremo inferior de la superficie de rotura se encuentra sobre el pie talud.

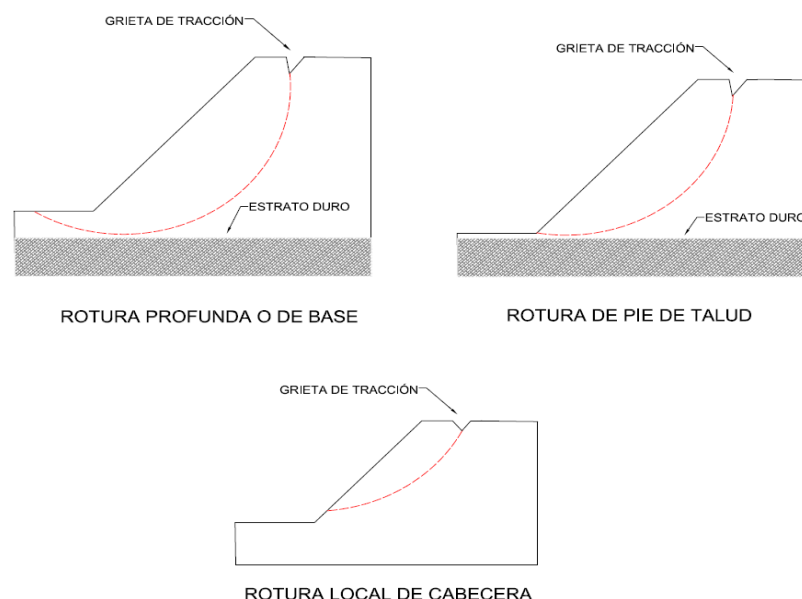


Figura 2: Diferentes tipologías de rotura circular en materiales con propiedades homogéneas. Fuente: Propia.

En el caso de taludes formados por estratos de materiales de diferente competencia, la superficie de rotura puede producirse a favor de una superficie plana (poco común) o a favor de una superficie poligonal formada por diferentes tramos planos. En estos casos el movimiento de la masa deslizada tiene una fuerte componente traslacional, aunque también puede existir cierto movimiento rotacional.

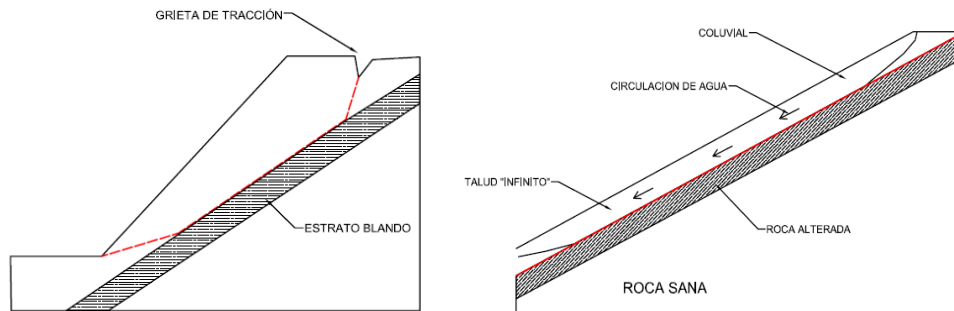


Figura 3: Casos de rotura poligonal y planar en taludes no homogéneos. Fuente: Propia.

Otros mecanismos de inestabilidad en taludes formados por materiales heterogéneos pueden ser el colapso del macizo o el desprendimiento de bloques individualizados, provocado por la erosión diferencial de los materiales menos competentes.

Los procesos de colapso se producen en macizos en los que existe una alternancia de capas de material duras y blandas. Debido a la presencia de agentes externos, se produce la erosión o socavación de los materiales menos competentes que dejan sin sostenimiento a los materiales situados sobre ellos produciendo hundimientos o colapsos.



Figura 4: Riesgo de hundimiento de parte del talud debido a la socavación de las capas más blandas situadas en la base. Fuente: Propia.

En el caso de que el talud esté formado por bloques rocosos en una matriz de material blando, la erosión diferencial o el lavado de los materiales menos competentes provoca la individualización y desprendimiento de los materiales más competentes.



Figura 5: Individualización de bloques debido a procesos de lavado y erosión diferencial de los materiales menos competentes. Fuente: Propia.

4.2. Taludes en roca

Las caídas y desprendimientos rocosos son una de las mayores amenazas que afectan a las vías de comunicación que atraviesan taludes formados por estos materiales.

El mecanismo de fallo de estos taludes está controlado principalmente por la estructura de las familias de discontinuidades existentes en ellos. Sin embargo, las masas de roca fracturadas presentan un comportamiento altamente anisotrópico con respecto a su resistencia al corte, por lo que definir una superficie de falla puede suponer un problema complejo controlado por numerosas variables que requiere un estudio en tres dimensiones.

Los principales factores que deben analizarse para controlar la estabilidad son [2]:

- La presencia de diferentes familias de discontinuidades.
- Orientación de las familias de discontinuidades y su relación con la cara del talud.
- Espaciamiento de las discontinuidades en las tres dimensiones.
- Valor de la resistencia al corte en las paredes de las discontinuidades.
- Persistencia de las discontinuidades a lo largo del talud.

El estudio estereográfico de la geometría de las familias de discontinuidades permite analizar el comportamiento del talud y definir la resistencia al corte de las discontinuidades sin tener en cuenta las cargas dinámicas o externas ni la presencia de agua en el talud. En la *Tabla 3* se resumen los diferentes tipos de rotura que pueden producirse en los macizos en roca.

TIPO DE ROTURA	DESCRIPCIÓN
Planar	La dirección de buzamiento de la discontinuidad coincide con la de la cara del talud
Cuña	La línea de intersección entre dos discontinuidades buza con la misma dirección que la cara del talud.
Circular	Se produce en rocas blandas o altamente fracturadas.
Vuelco	Bloques esbeltos tabulares o columnares formados por discontinuidades muy verticalizadas o con discontinuidades basales.
Flexión	Grupos de discontinuidades muy verticales con espaciamientos muy reducidos.
Desprendimientos	Bloques sueltos que pueden volcarse o deslizarse por caída libre, a saltos o rodando.

Tabla 3: Tipos de rotura en macizos rocosos fracturados. Fuente: Modificado de Suárez, J., 2012.

4.2.1. Rotura planar

La rotura planar es producida debido al desplazamiento de la masa rocosa sobre una discontinuidad que consiste en una superficie planar basal. Para que se produzca este tipo de rotura, la condición indispensable es que exista una superficie de rotura que aflore sobre la superficie del talud, que sea suficientemente larga y con una orientación desfavorable en relación a la cara del talud.

Este tipo de roturas son producidas por una disminución progresiva de la resistencia al corte sobre las caras de la discontinuidad lo que puede ser inducido debido a [2]:

- Proceso de **deformación** que provoca que el parámetro de resistencia sea controlado por la resistencia residual del material.
- Fenómenos de **meteorización** que provocan la atenuación de las características resistentes sobre la superficie de debilidad.
- Aumento de las presiones intersticiales debido a la acumulación de agua que provoca movimientos debido a la reducción de la resistencia a la fricción.
- Movimientos sísmicos que provocan el agrietamiento de los materiales, licuefacción del relleno o desplazamientos debido a la acción de las fuerzas sísmicas.

Para predecir este tipo de roturas, existe una serie de condiciones límite que pueden dibujarse sobre una falsilla estereográfica y realizar un diagrama de contornos de densidad de polos para identificar planos potenciales de deslizamiento planar. De esta forma, para que se produzca un deslizamiento planar deben cumplirse las siguientes condiciones [3]:

- El plano de discontinuidad debe tener una dirección aproximadamente paralela a la cara del talud, con una diferencia menor de $\pm 20^\circ$.
- La dirección de buzamiento de la discontinuidad debe tener una dirección a favor de la dirección de buzamiento del talud y su ángulo debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie.
- Los límites laterales de la masa movilizable deben poseer poca resistencia.
- El plano de deslizamiento debe aflorar sobre la superficie del talud.
- La cabeza del deslizamiento debe interceptar la superficie del talud o terminar en una grieta de fricción.

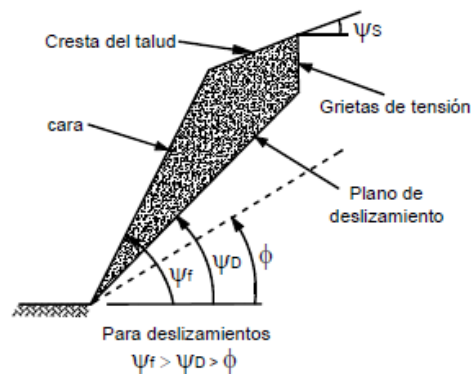


Figura 6: Condicionantes que deben cumplirse para que ocurra una falla planar en roca. Fuente: Eberhardt, 2007.

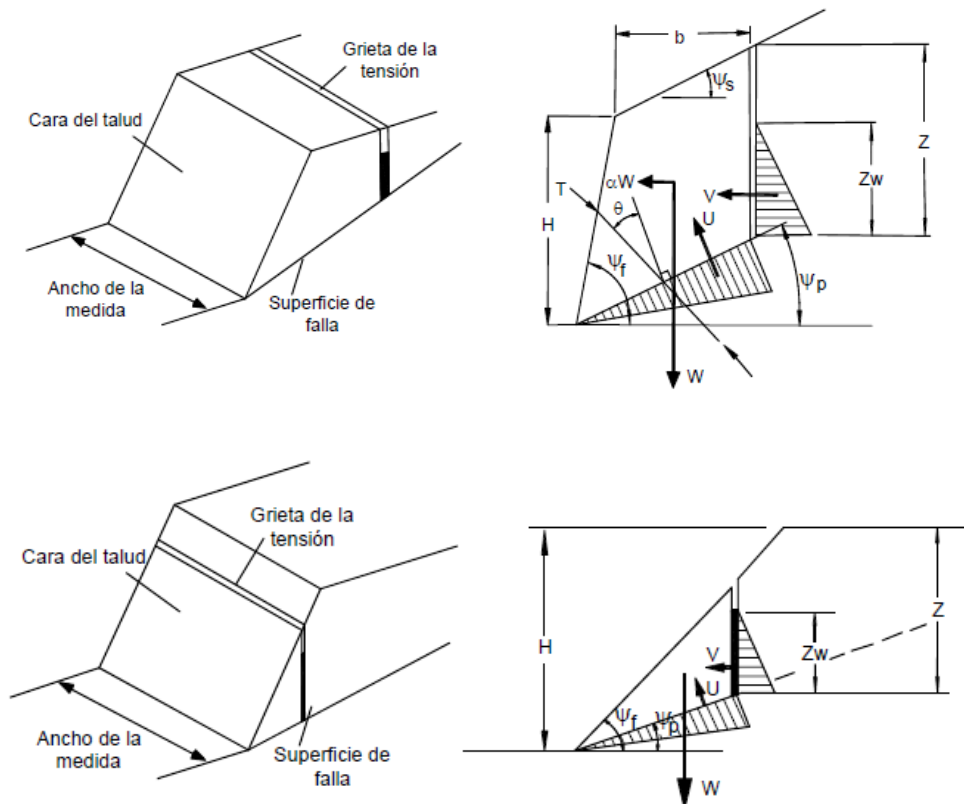


Figura 7: Análisis geotécnico convencional de una rotura planar. Aparición de grietas de tensión sobre la cabeza del talud (arriba) y grietas de tensión bajo la cabeza del talud (abajo). Fuente: Suárez, J., 2012.

Para realizar un **análisis cualitativo** de la estabilidad potencial de roturas planares en un talud puede seguirse el siguiente procedimiento que tiene en cuenta las condiciones límite definidas anteriormente [3]:

1. Medición en campo de la orientación y buzamiento de la cara del talud y de las diferentes familias de discontinuidades existentes.
2. Representación estereográfica del diagrama de polos de las discontinuidades existentes.

3. Representación del plano del talud limitando el área de los posibles planos de discontinuidad paralelos con una diferencia de $\pm 20^\circ$.
4. Representación del ángulo de fricción de las discontinuidades. Si no se dispone de esta información, puede aproximarse mediante tablas de valores representativos en función del tipo de material.
5. La cantidad de polos de las discontinuidades que queden dentro de la región definida entre el ángulo de fricción del material, el plano del talud y los planos paralelos al mismo con un rango diferencial de $\pm 20^\circ$ (área en rojo representada en la *Figura 8*), representarán una medida semicuantitativa del potencial de rotura.

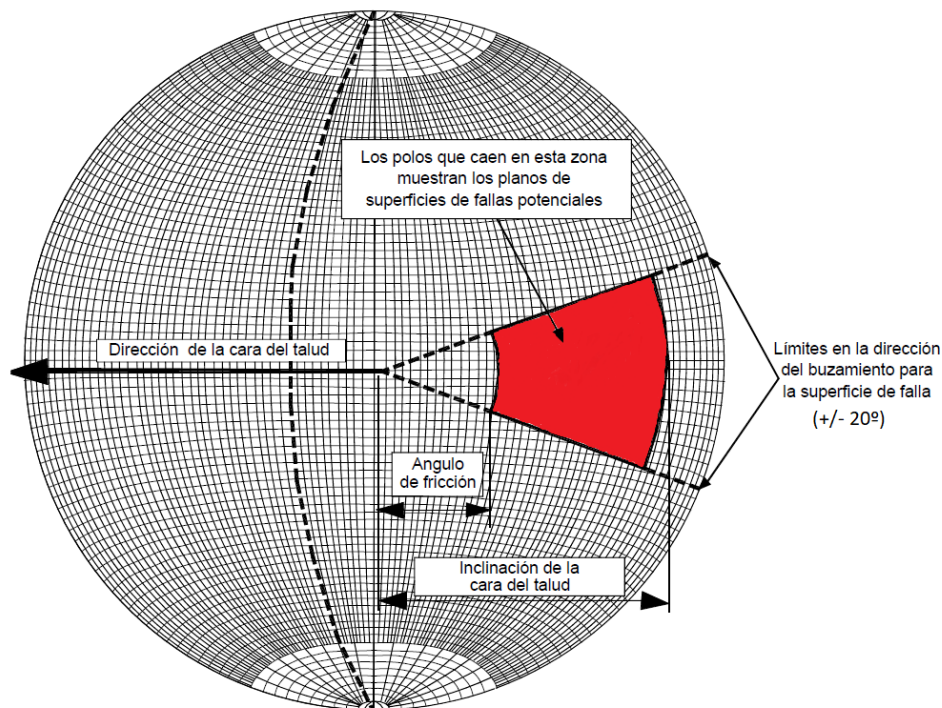


Figura 8: Delimitación del área donde la existencia de polos de superficies de rotura representará la posibilidad de rotura planar en un talud. Fuente: Modificado de Matherson, G.D., 1983.

También existe un método cuantitativo para determinar el riesgo de roturas planares en un talud. Los cálculos tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- La masa de roca se mueve en dirección paralela a la superficie de falla.
- Las grietas de tensión pueden ser verticales y pueden estar rellenas de agua hasta una determinada profundidad. El análisis debe incluir la contabilización de las fuerzas de presión ejercidas por el agua tanto en el interior de las grietas como en la superficie de rotura.
- Se supone que no existen momentos de fuerzas que causen la rotación del bloque deslizado, todas las fuerzas actúan a través del centroide de la masa deslizada, por lo tanto, el deslizamiento tiene únicamente componente traslacional.
- Se desprecian las resistencias laterales sobre los estribos del bloque.
- La resistencia a la fricción de la superficie de rotura queda definida por la cohesión real o aparente del material (c), su ángulo de fricción básico (ϕ_b), el

ángulo de rugosidad (i), el coeficiente de rugosidad de la junta (JRC) y la resistencia a compresión de la junta (JCS):

$$FS = \frac{cA + (W \cdot \cos \Psi_p - U - V \cdot \sin \Psi_p) \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \Psi_p + V \cdot \cos \Psi_p}$$

Donde:

$$A = (H + b \cdot \tan \Psi_s - z) \operatorname{cosec} \Psi_p$$

$$U = 0.5 \gamma_w z_w (H + b \cdot \tan \Psi_s - z) \operatorname{cosec} \Psi_p$$

$$V = 0.5 \gamma_w z_w^2$$

Para la grieta de tensión en la cabecera del talud:

$$W = 0.5 \gamma_r H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) (\cotan \Psi_p (\operatorname{cosec} \Psi_p \cdot \tan \Psi_f - 1)) \right]$$

4.2.2. Rotura en cuña

Un caso muy común de rotura de macizos rocosos se produce cuando la línea de intersección entre dos discontinuidades tiene dirección y buzamiento hacia la cara del talud. En estos casos, se produce un desplazamiento en la dirección de la línea de intersección de la masa de roca contenida entre ambas discontinuidades.

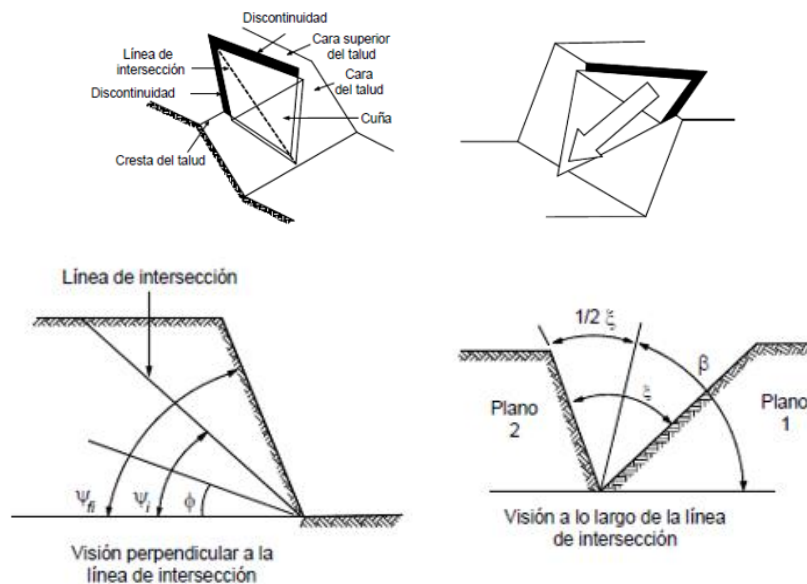


Figura 9: Esquema general de rotura en cuña. Fuente: Suárez, J., 2012.

Para que se produzca una rotura por cuña deben satisfacerse las siguientes condiciones [4]:

- La parte inferior de la línea de intersección entre los dos planos de cuña debe aflorar sobre la superficie del talud y por encima del pie.
- La parte superior de la línea de intersección entre los planos de cuña debe interceptar la superficie del talud en su cabeza, por encima de la misma o en una grieta de tensión.

- El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que los ángulos de fricción de los planos de deslizamiento ($\Psi_i > \phi$) y los esfuerzos de cortante deben superar la resistencia conjunta de los dos planos que forman la cuña.
- El ángulo de inclinación del talud debe ser mayor que el ángulo de la línea de intersección de los dos planos que forman la cuña ($\Psi_{fi} > \Psi_i$).

Al igual que en el caso de rotura plana, las condiciones límite de la rotura en cuña pueden representarse estereográficamente para realizar un **análisis cualitativo** del potencial de rotura en cuña en un talud. Para ello se seguirá un procedimiento similar que, en el análisis de la rotura plana, si bien, en este caso, el área de rotura en cuña potencial (área en rojo de la *Figura 10*) será delimitada sólo por el ángulo de fricción del material y el ángulo de inclinación del talud. Para realizar una valoración semicuantitativa deberá considerarse la importancia relativa o persistencia de la concentración de polos de la línea de intersección entre las discontinuidades que forman la cuña de deslizamiento.

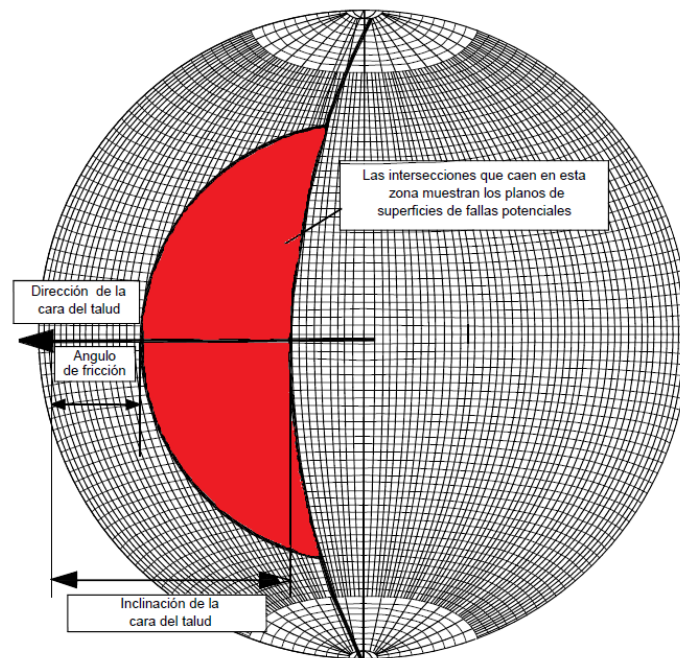


Figura 10: Diagrama estereográfico para análisis de roturas en cuña. Fuente: Modificado de Matherson, G.D., 1983.

El **análisis cuantitativo** de la rotura en cuña es bastante complejo, ya que debe realizarse en las tres dimensiones del espacio teniendo en cuenta una gran cantidad de variables geométricas, por lo que en la actualidad suele realizarse mediante programas informáticos de cálculo debido a su complejidad.

Este método desprecia el valor de las fuerzas exteriores y asume que el deslizamiento es resistido únicamente por las fuerzas de fricción. De esta forma, el factor de seguridad de las roturas en cuña se calcula a partir de la siguiente ecuación [5,6]:

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \cdot \sin \Psi_i}$$

Donde R_A y R_B corresponden a las reacciones normales generadas por los planos que forman la cuña (A y B), obtenidos mediante la resolución de las componentes normales y paralelas a la dirección a lo largo de la línea de intersección de la siguiente forma:

$$R_A \cdot \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \cdot \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right)$$

$$R_A \cdot \cos \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) + R_B \cdot \cos \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right) = W \cdot \cos \Psi_i$$

Los ángulos β y ξ corresponden a las relaciones entre los planos de cuña tal y como se muestra en la *Figura 9*.

Finalmente se resuelve para R_A y R_B :

$$R_A + R_B = \frac{W \cdot \sin \Psi_i \cdot \cos \beta}{\sin \left(\xi/2 \right)}$$

Por lo que el factor de seguridad resultará:

$$FS = \frac{\sin \beta}{\sin \left(\xi/2 \right)} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \Psi_i} = K \cdot FS_{Rotura Plana}$$

De esta forma, el valor del factor de seguridad para la rotura en cuña puede calcularse en función del valor obtenido para rotura plana a partir del factor K, cuyo valor depende de las inclinaciones de los planos de rotura y puede obtenerse a partir de gráficas (*Figura 11*) desarrolladas a partir de los procedimientos de Hoek y Bray [7].

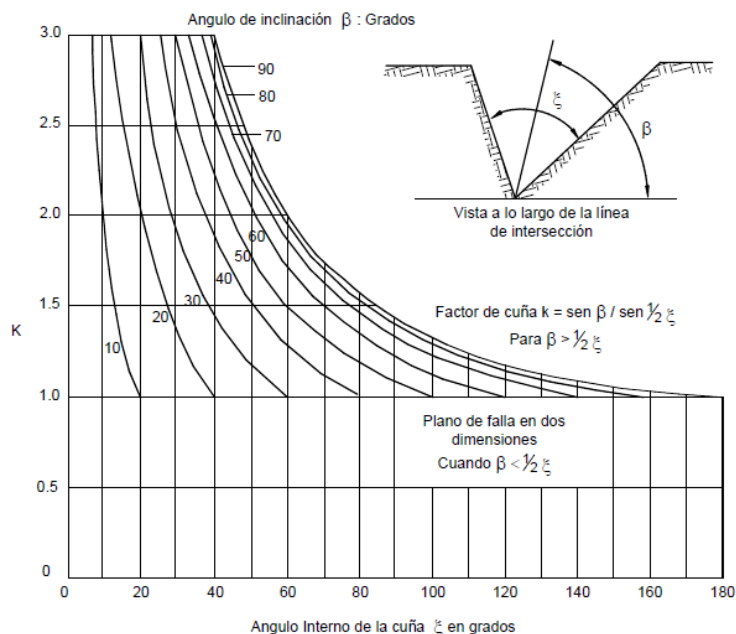


Figura 11: Gráfico para la obtención simplificada del ángulo interno de la cuña (ξ) en grados. Fuente: Hoek, E., Bray, J.W., 1981.

4.2.3. Rotura circular

Las roturas circulares son los mecanismos de rotura más comunes en los taludes formados por suelos. Sin embargo, en algunas ocasiones, este tipo de roturas pueden desarrollarse también en macizos rocosos, generalmente como etapa final de alguno de los mecanismos descritos anteriormente, cuando se producen en masas de roca blandas o altamente meteorizadas con presencia de discontinuidades aleatorias que no forman familias.

Esta situación ocurre cuando aumentan los procesos de deformación en el macizo rocoso, de modo que los bloques empiezan a comportarse como elementos que conforman una masa gravitacional, hasta que fallan a favor de una superficie curva que no existía antes de la rotura.

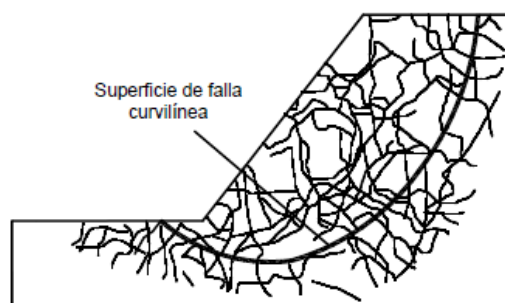


Figura 12: Esquema de formación de superficie de rotura circular en un macizo rocoso debido a la existencia de una gran fracturación sin ningún patrón en común. La roca pasa a comportarse como un suelo. Fuente: Suárez, J., 2012.

La superficie de rotura se desarrolla aprovechando planos de debilidad en el macizo como pueden ser la esquistosidad, la foliación o la estructura tectónica, que pueden relacionarse entre sí formando una matriz heterogénea de concentración de esfuerzos por donde evoluciona la superficie de rotura.

De esta forma, la masa rocosa pasa a comportarse de forma muy similar a un suelo, por lo que los sistemas utilizados para el análisis de este tipo de rotura son muy similares a los que se utilizan en el análisis de rotura circular en suelos.

4.2.4. Rotura por vuelco ("toppling")

Los procesos de rotura por vuelco en macizos rocosos son producidos por la inclinación de estructuras semi-verticalizadas debido a la acción de la gravedad. En estos casos, la inclinación de las estructuras suele ir acompañada por un proceso de rotura a cortante en la zona intermedia entre diferentes capas sucesivas dentro de la masa rocosa.

Las discontinuidades propensas a provocar fenómenos de rotura por vuelco son generalmente las direcciones predominantes de fractura, la estratificación en rocas sedimentarias, y la foliación o esquistosidad en rocas metamórficas [8,9]. En el caso de las rocas cristalinas, este tipo de rotura sólo puede ocurrir si existe una esquistosidad o foliación muy verticalizada y con una dirección aproximadamente paralela a la dirección de la cara del talud [10].

A largo plazo, los bloques volcados pueden generar una nueva superficie de rotura que se desarrolla sobre la base los mismos generando una rotura planar o rotacional que, combinada con el vuelco, provoca un deslizamiento de toda la masa anteriormente movilizada.

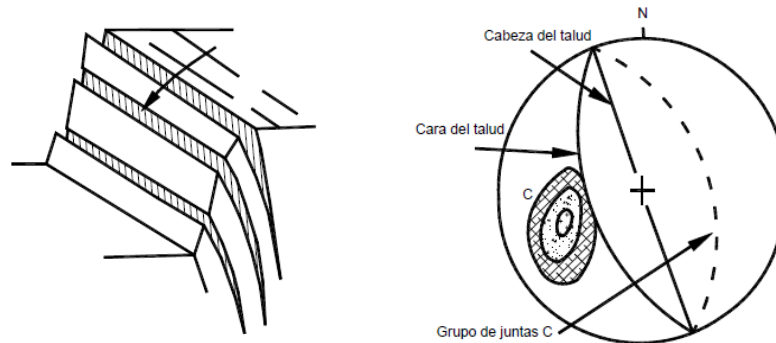


Figura 13: Esquema general de rotura por vuelco. Fuente: Suárez, J.,2012.

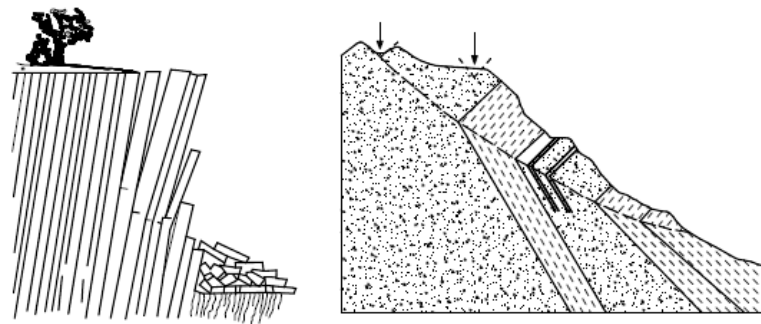


Figura 14: Esquema general de deslizamiento a largo plazo producido por una rotura por vuelco previa. Fuente: Suárez, J.,2012.

Existen diversos tipos de rotura por vuelco entre los que se encuentran el vuelco a flexión, el vuelco de bloques, el vuelco hacia atrás y el vuelco múltiple.

• Vuelco por flexión

El vuelco por flexión consiste en la inclinación progresiva de varias capas sucesivas de roca como si se tratara de una serie de vigas en voladizo. El proceso de rotura se produce en capas de roca verticalizadas debido a que cada capa de roca sufre una flexión en la parte superior debido a su propio peso y transfiere esa fuerza a la siguiente capa. De esta forma cada capa de roca funciona como una columna rígida que sufre una rotura debido a la tensión con lo que este tipo de vuelco produce la fractura de los bloques de roca que sufren el movimiento.

Este tipo de rotura suele producirse en rocas con foliación o formadas por capas delgadas tales como las lutitas, las pizarras o los esquistos.

Para que se produzca un vuelco por flexión en un talud deben satisfacerse las siguientes condiciones:

- Existencia de deslizamiento por flexión entre capas de roca con espaciamientos muy cercanos.
- Las fracturas con alto ángulo de buzamiento deben estar en equilibrio límite.

- Para que una fractura se encuentre en estado de equilibrio límite se debe cumplir que el ángulo formado por el polo (perpendicular) de la discontinuidad con la horizontal sea menor que la diferencia entre el ángulo formado por la dirección de máxima tensión con la misma horizontal y el ángulo de rozamiento interno del material ($90 - \beta < \theta - \phi$).

La rotura por vuelco suele ocurrir cuando la diferencia entre la dirección de las discontinuidades verticales y la de la cara del talud son menores a 30° , y la probabilidad aumenta cuando la diferencia entre las dos direcciones es menor a 15° .

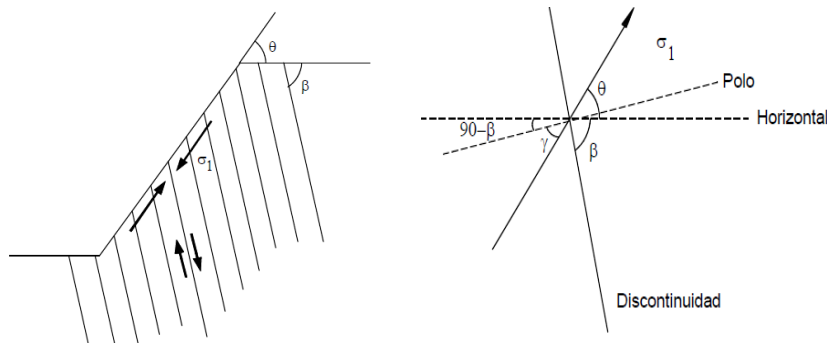


Figura 15: Esquema de las condiciones cinemáticas de vuelco por flexión. Fuente: Suárez, J., 2012.

La representación estereográfica de las anteriores condiciones permite delimitar el área de alta probabilidad de rotura por vuelco por flexión (área en rojo) y el área de rotura potencial en el caso de que exista poco espaciamiento entre las juntas (área en amarillo), tal como se puede observar en la Figura 16.

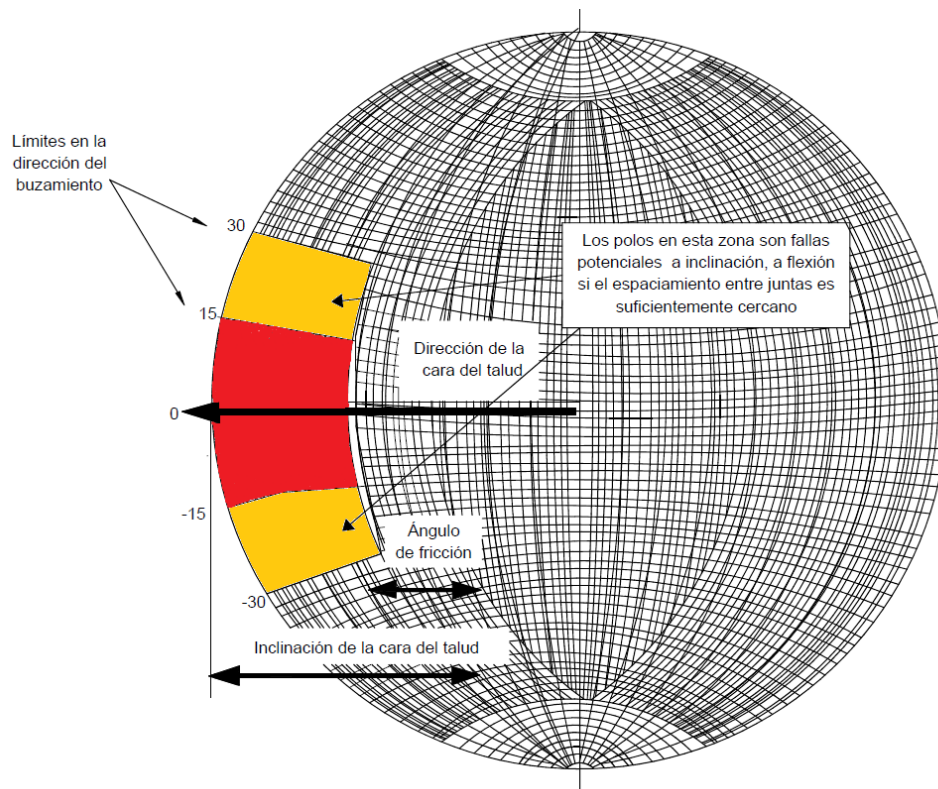


Figura 16: Diagrama estereográfico para el análisis de roturas en vuelco por flexión. Fuente: Modificado de Matherson, G.D., 1983.

- **Vuelco de bloques**

El vuelco de bloques se produce en macizos rocosos cuyas discontinuidades forman bloques columnares o tabulares con un espaciamiento relativamente alto entre ellos.

Para que se produzca el vuelco de bloques en un macizo rocoso deben cumplirse las siguientes condiciones [3]:

- La dirección del plano basal debe tener una diferencia máxima de 20° con la pendiente del talud.
- El ángulo de buzamiento del plano basal debe ser menor que el ángulo de fricción de la discontinuidad correspondiente a ese plano.
- La dirección de las líneas de intersección entre discontinuidades debe tener una diferencia menor de 20° con la dirección de la cara del talud. Para pendientes muy fuertes puede extenderse hasta 90° .
- El buzamiento de las líneas de intersección debe ser mayor que la diferencia entre el polo del plano y su ángulo de fricción interno ($90 - \phi$).

La representación estereográfica de las anteriores condiciones permite realizar una estimación del potencial de rotura por vuelco de bloques. En la *Figura 18* se puede observar esta representación, donde el área en rojo corresponde a la situación de los polos de las discontinuidades potenciales de rotura y el área en amarillo los polos potenciales de rotura en el caso de discontinuidades de fuerte pendiente.

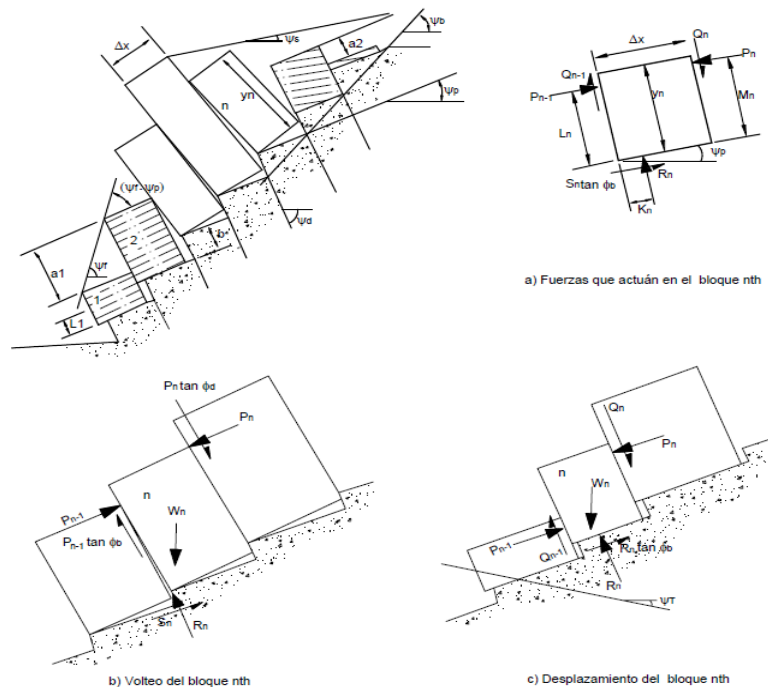


Figura 17: Esquema de las condiciones cinemáticas de vuelco de bloques. Fuente: Suárez, J., 2012.

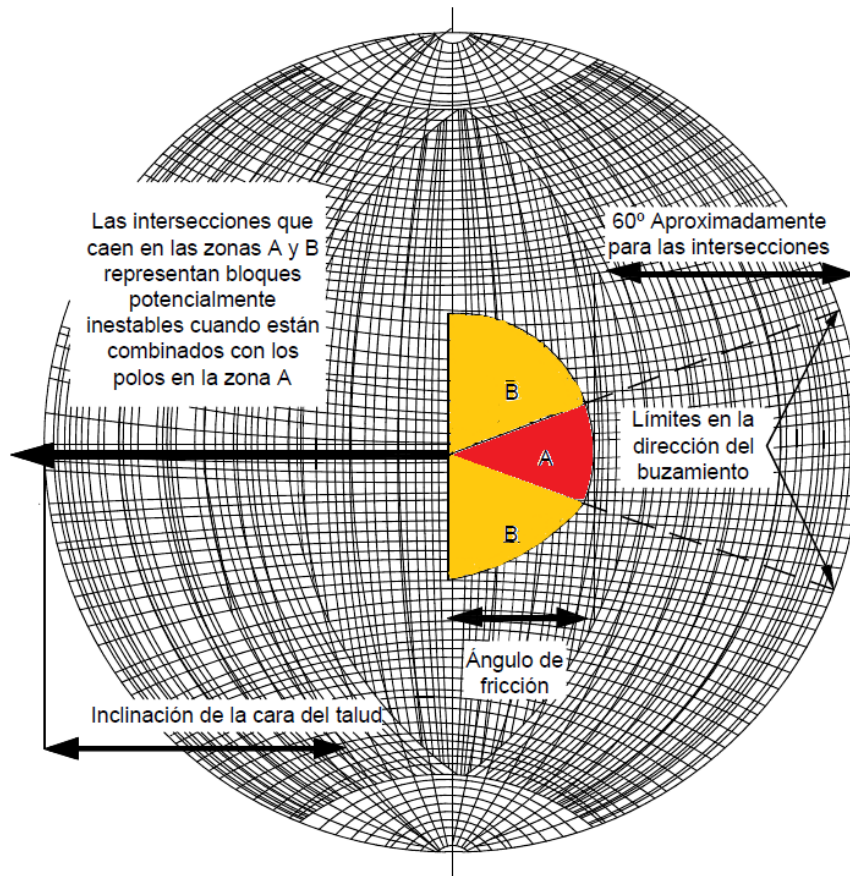


Figura 18: Diagrama estereográfico para el análisis de roturas por vuelco de bloques. Fuente: Modificado de Matherson, 1983.

La estabilidad por vuelco de bloques no puede analizarse en términos cuantitativos utilizando un factor de seguridad, por lo que Goodman y Bray [10] desarrollaron un método para el análisis de la estabilidad de vuelco de bloques que considera las fuerzas de equilibrio de cada bloque empezando por el más alto y estableciendo la fuerza de interacción con el bloque adyacente hacia abajo. Cuando la fuerza obtenida en el bloque de la base del macizo es positiva, el talud es considerado inestable y cuando es cero se considera que se encuentra en condición de equilibrio límite. Hoy en día existen programas informáticos que permiten realizar un análisis preciso basándose en métodos numéricos.

- **Vuelco hacia atrás**

Las roturas producidas por vuelco hacia atrás se producen cuando los bloques individualizados por las discontinuidades tienen un gran tamaño, resultan relativamente esbeltos y con juntas semiparalelas a la superficie del terreno. En estos casos la rotura se produce debido al deslizamiento y giro hacia atrás de los bloques sobre las discontinuidades. Se trata de un movimiento complejo por lo que es recomendable calcular la estabilidad en este tipo de casos mediante programas de cálculo informáticos tal como puede observarse en la Figura 19 donde el diagrama de vuelco se ha modelizado mediante el programa UDEC [11].

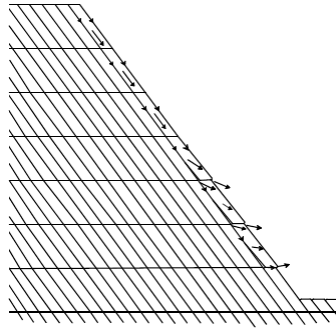


Figura 19: Diagrama de vuelco hacia atrás analizado mediante el software UDEC. Fuente: Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004.

- **Vuelco múltiple**

La rotura por vuelco múltiple se produce cuando existen grupos de discontinuidades que provocan la formación de una superficie de rotura por vuelco en escalera de los diferentes bloques.

Este fenómeno puede incluir fallas de tensión y corte a lo largo de las discontinuidades y en la roca intacta provocando la aparición de planos de corte.

- **Rotura progresiva**

La rotura progresiva en un talud es debida a la presencia de discontinuidades semiverticales que provocan la aparición de procesos de deformación debido a la presencia de esfuerzos de tensión. Esto provoca la aparición de microgrietas en la superficie del talud que pueden profundizar hasta alcanzar un rango de decenas de metros en los macizos de gran altura.

En estos casos, la inestabilidad puede propagarse a lo largo de una línea por rotura progresiva o por vuelo [12]. Al no existir una superficie de rotura previa, se produce un proceso de regresión de las características resistentes a lo largo de un área que no queda perfectamente definida localizada a profundidad en el interior de la roca. En la *Figura 20* puede observarse el proceso de formación de la superficie de rotura progresiva y en la *Figura 21* un caso de deslizamiento y vuelco profundo producido en rocas metamórficas debido a este proceso.

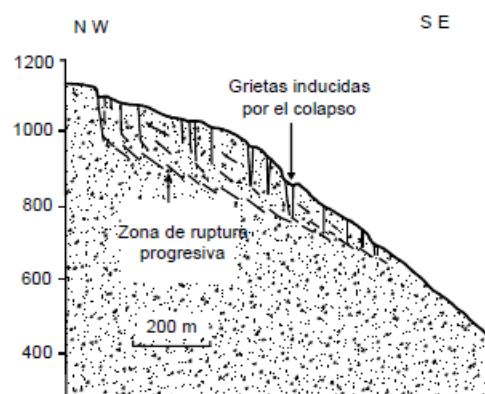


Figura 20: Rotura progresiva inducido por la presencia de fracturas semiverticales en la superficie del talud. Fuente: Giraud, et. al., 1990.

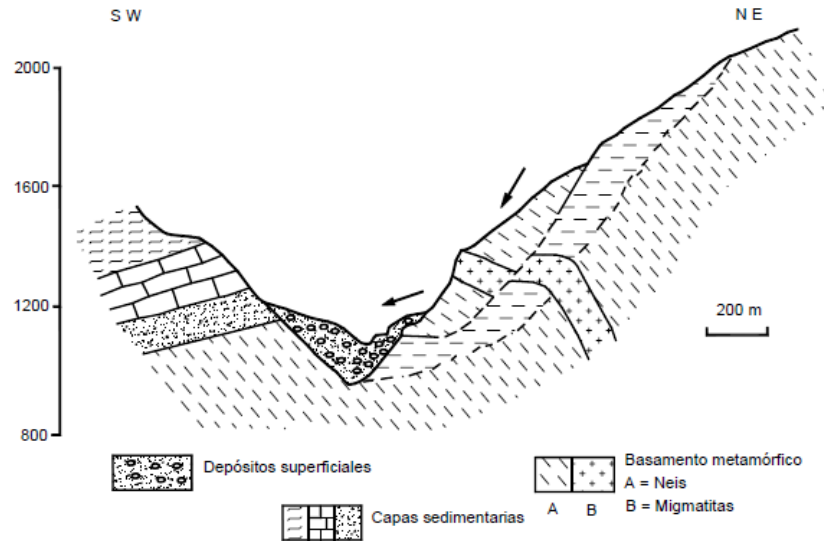


Figura 21: Vuelco profundo y deslizamiento en rocas metamórficas. Fuente: Giraud, et. al., 1990.

4.2.5. Rotura por flexión

El hundimiento, alabeo o flexión de la estructura de la roca, “Sagging” en inglés, se produce debido a la existencia de una rotura interna del macizo que causa un colapso en su interior. Debido a esta rotura interna, se producen agrietamientos que se extienden a toda la masa rocosa sin que exista una superficie claramente identificada de movimiento [13,14].

Las condiciones estructurales que favorecen este proceso de rotura son las siguientes:

- Existencia de estructuras anisotrópicas como esquistosidad o foliación que dan lugar a un comportamiento mecánico anisotrópico a todo el talud.
- Existencia de planos de debilidad intersecados de forma oblicua con otros sistemas de fracturas.
- Existencia de un campo de esfuerzos con una dirección desfavorable a la dirección del talud.

Estas características son muy comunes en las rocas con estructura cristalina, razón por que son especialmente susceptibles a este tipo de rotura.

Los mecanismos que provocan la activación de este tipo de rotura son los siguientes:

- Alta concentración de esfuerzos y reducción de las propiedades resistentes de la roca debido a procesos de meteorización.
- Reducción del esfuerzo de confinamiento provocado por procesos de erosión a largo plazo.
- Sobrecargas dinámicas debidas por ejemplo a la presencia de movimientos sísmicos.

5. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS

Las clasificaciones geomecánicas son un elemento fundamental para la caracterización y estimación de la calidad de los macizos rocosos basadas en observaciones de campo y ensayos sencillos.

Existen diversos sistemas de clasificación aplicables a macizos rocosos en función del tipo de actuación de obra civil que comprometa su estabilidad. Este capítulo se centrará en las clasificaciones RMR de Bieniawski y SMR de Romana. La clasificación RMR es una clasificación general aplicable para taludes, túneles y cimentaciones mientras que la clasificación SMR consiste en una adaptación para taludes del RMR de Bieniawski.

5.1. Clasificación RMR de Bieniawski

Una de las clasificaciones geomecánicas más conocidas es el Índice RMR de Bieniawski, que indica la calidad del macizo rocoso en cada dominio estructural en función de 5 parámetros [15]:

- La resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- El grado de fracturación en parámetros del RQD.
- El espaciado de las discontinuidades.
- Las características de las discontinuidades
- Parámetros o condiciones hidrogeológicas.
- La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de excavación.
- Corrección por la orientación de las discontinuidades.

El método de Bieniawski permite obtener un índice representativo de la calidad del macizo rocoso comprendido entre 15 y 100. Este índice se obtiene mediante el sumatorio de la puntuación otorgada a cada parámetro indicado. A continuación, se desarrolla el proceso de puntuación para cada uno de ellos.

5.1.1. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta

La resistencia a compresión simple puede determinarse en función de ensayos de carga puntual o utilizando tablas de valores límite en función del material (*Tabla 4*).

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)				TIPO DE ROCA	RESISTENCIA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)		
	Mín.	Máx.	Medio			Mín.	Máx.	Medio
Creta	1	2	1.5		Dolomía	83	165	127
Sal	15	29	22		Andesita	127	138	128
Carbón	13	41	31		Granito	153	233	188
Limonita	25	38	32		Gneis	159	256	195
Esquisto	31	70	43		Basalto	168	359	252
Pizarra	33	150	70		Cuarcita	200	304	252

Arcillita	36	172	95		Dolerita	227	319	280
Arenisca	40	179	95		Gabro	290	326	298
Marga	52	152	99		Taconita	425	475	450
Màrmol	60	140	112		Sílice	587	683	635
Caliza	69	180	121					

Tabla 4: Valores medios de resistencia a compresión simple de algunos tipos de roca. Fuente: Prof. Francisco Bongiorno.

De acuerdo la resistencia a compresión simple o el índice de carga puntual se valorará el macizo con un valor del 0 al 15 según la siguiente tabla:

Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1			
Compresión simple (Mpa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
Puntuación RMR	15	12	7	4	2	1	0

Tabla 5: Valoración de resistencia a compresión simple para cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.2. Calidad del testigo RQD

La calidad de la roca se determina a partir del porcentaje de roca testigo, mayor de 10 cm, recuperado en un sondeo o a partir del factor J_v , que corresponde al número de juntas por metro cúbico observadas en un afloramiento.

En el primer caso:

$$RQD = \left[\frac{n^{\circ} \text{ de fragmentos extraídos } > 10 \text{ cm}}{\text{longitud total perforación}} \right] \times 100$$

En el caso de considerar el número de juntas por metro cúbico (J_v):

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

En función del valor del RQD se valorará al macizo con un valor del 3 al 20 en función de las relaciones siguientes:

RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%
Puntuación RMR	20	17	13	6	3

Tabla 6: Valoración de la calidad del testigo de la roca para el cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.3. Espaciado entre juntas o discontinuidades

La distancia medida entre los planos de discontinuidad de cada familia se valora con una puntuación de 5 a 20 en función de las relaciones siguientes:

Separación entre diaclasas	>2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 2 m	0.06 – 0.2 m	<0.06 m
Puntuación RMR	20	15	10	8	5

Tabla 7: Valoración del espaciado entre las discontinuidades para el cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.4. Características de las discontinuidades

La valoración de las características o estado de las discontinuidades se realiza con una puntuación de 0 a 30 considerando los parámetros y características contenidos en la siguiente tabla:

Longitud de la discontinuidad	>1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
Puntuación RMR	6	5	2	1	0
Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 mm	>5 mm
Puntuación RMR	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave
Puntuación RMR	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Duro < 5mm	Duro > 5mm	Blando <5mm	Blando >5 mm
Puntuación RMR	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
Puntuación RMR	6	5	3	1	0

Tabla 8: Valoración del estado de las discontinuidades para el cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.5. Condiciones hidrogeológicas

La presencia de agua en un macizo rocoso fracturado ejerce una gran influencia sobre su comportamiento. La valoración del estado de agua en el macizo se realiza mediante una puntuación de 0 a 15 según la siguiente tabla:

Caudal por 10 m del túnel	Nulo	10 l/min	10 – 25 l/min	25 – 125 l/min	>125 l/min
Relación Presión de agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	>0.5
Estado general	Seco	Ligeramente seco	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
Puntuación RMR	15	10	7	4	0

Tabla 9: Valoración de las condiciones hidrogeológicas para el cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.6. Corrección por la orientación de las discontinuidades

El último factor establece una corrección del valor RMR en función del rumbo y el buzamiento de las discontinuidades en función de la obra civil presente. Las correcciones toman valores de 0 a -60 puntos, diferenciando entre macizos rocosos en túneles, en taludes o en cimentaciones en función a lo especificado en la siguiente tabla:

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación RMR	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 10: Valoración de dirección y buzamiento de las discontinuidades presentes respecto la obra civil para el cálculo del índice RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.1.7. Clasificación de taludes en función del RMR

El sumatorio de la valoración de los factores descritos, permite clasificar la calidad del macizo rocoso en función de las relaciones establecidas en la *Tabla 11*. Tal y como puede observarse, además de una clasificación cualitativa, esta clasificación permite obtener un rango cuantitativo del valor de la cohesión y el ángulo de rozamiento interno del talud.

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR	COHESIÓN [Kg/cm ²]	ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO
I	Muy buena	100-81	>4	>45°
II	Buena	80-61	3-4	35°-45°
III	Media	60-41	2-3	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2	15°-25°
V	Muy mala	<20	<1	<15°

Tabla 11: Calidad de macizos rocosos en relación al RMR. Fuente: Bieniawski, 1989.

5.2. Clasificación SMR

La corrección sugerida por Bieniawski para considerar el efecto de las discontinuidades sobre el valor del índice RMR no resulta fácilmente aplicable a las clasificaciones geomecánicas de taludes. Esto es debido a que esta corrección puede alcanzar un valor de -60 puntos sobre un total de 100, por lo que cualquier error cometido en la valoración de este factor puede ocasionar una importante pérdida de precisión en la valoración de la calidad del macizo.

Por este motivo, Romana [16,17] elaboró la clasificación SMR, que aplica un factor de ajuste a la clasificación RMR, en función de una cuidadosa valoración de la orientación de las juntas respecto a la cara del talud y el método de excavación aplicado:

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

Donde:

- **F1:** Valoración del paralelismo existente entre la dirección de las juntas y la de la cara del talud. Este factor varía entre 1 (cuando ambas direcciones son muy paralelas) y 0.15 (cuando la diferencia entre ambas direcciones es mayor a 30° y la probabilidad de rotura es baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

$$F_1 = (1 - \sin|\alpha_j - \alpha_s|)$$

Donde, α_j y α_s corresponden a la dirección de buzamiento de la junta y de la cara del talud respectivamente.

- **F2:** Mide la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Realiza una valoración del buzamiento de la junta para la rotura plana con un valor que varía entre 1 (para juntas con un buzamiento mayor a 45°) y 0.15 (para juntas con un buzamiento menor a 20°). Este valor puede ajustarse aproximarse según la relación:

$$F_2 = \tan^2(\beta_j)$$

Donde β_j corresponde al valor del buzamiento de la junta y toma siempre un valor de $F_2=1$ para roturas por vuelco.

- **F3:** Valoración de la relación entre los buzamientos de la junta y de la cara del talud. Este factor expresa la probabilidad de que las juntas afloren en el talud en el caso de roturas planas y mantiene los valores propuestos por Bieniawski con valores comprendidos entre 0 y -60 según las siguientes relaciones:

Rotura por vuelco	Rotura plana	F ₃
$\beta_s - \beta_j > 10^\circ$	$\beta_s + \beta_j < 10^\circ$	0
$10^\circ > \beta_s - \beta_j > 0$	$110^\circ < \beta_s + \beta_j < 120^\circ$	-6
$\beta_s - \beta_j = 0^\circ$	$\beta_s + \beta_j > 120^\circ$	-25
$0 < \beta_s - \beta_j < -10^\circ$	—	-50
$\beta_s - \beta_j < -10^\circ$	—	-60

Tabla 12: Valoración de la relación entre los buzamientos de la junta (β_j) y de la cara del talud (β_s) para el cálculo del índice SMR. Fuente: Romana, 1985.

- **F4:** Valoración de la calidad del talud en función del método de excavación utilizado. Este factor fue establecido empíricamente y toma valores de -8 (voladura deficiente) a 15 (talud natural).

En la *Tabla 13* se muestra la valoración de los factores de ajuste para el cálculo del índice SMR para taludes en roca.

El valor del índice SMR permite determinar la frecuencia de cada tipo de rotura (*Tabla 14*) y clasificar los taludes en 5 clases en función de la calidad de la roca, la estabilidad del talud, la magnitud y cantidad de discontinuidades o superficies de rotura y la necesidad de actuaciones de estabilización tal y como se muestra en la *Tabla 15*.

Para aplicar los criterios de clasificación del índice SMR, hay que tener en cuenta dos situaciones específicas:

- Si existen diferentes familias de juntas en el talud, habrá que calcular el SMR por separado para todas ellas y considerar el resultado más desfavorable.
- En el caso de rocas meteorizadas o evolutivas, deberá calcularse el SMR para la situación inicial de la roca sana y para la futura roca meteorizada.

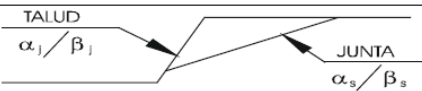
$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$ (ROMANA, 1985)					
FACTORES DE AJUSTE DE LAS JUNTAS (F_1, F_2, F_3)			α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD		
	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
ROTURA PLANA $ \alpha_j - \alpha_s =$	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
VUELCO $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
AJUSTE ANALÍTICO $F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$					
VALORES $ \beta_j =$	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
AJUSTE ANALÍTICO $F_2 = \tan^2 \beta_j$					
ROTURA PLANA $\beta_j - \beta_s =$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
VUELCO $\beta_j + \beta_s =$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
AJUSTE ANALÍTICO $F_3 =$ (SE MANTIENEN LOS VALORES PROPUESTOS POR BIENIAWSKI, 1976 / 79)					
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN $F_4 =$ VALORES EMPÍRICOS ESTABLECIDOS PARA CADA MÉTODO DE EXCAVACIÓN					
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA 6 MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE
	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8

Tabla 13: Valoración de la orientación de las juntas respecto a la cara del talud y el método de excavación para el cálculo del índice SMR. Fuente: Romana, 1985.

TIPO DE ROTURA	INTERVALOS SMR	FRECUENCIA
PLANAS	SMR>60	Ninguna
	60>SMR>40	Importantes
	40>SMR>15	Muy grandes
EN CUÑA	SMR>75	Muy pocas
	75>SMR>49	Algunas
	55>SMR>30	Muchas
POR VUELCO	SMR>65	Ninguna
	65>SMR>50	Menores
	40>SMR>30	Importantes
COMPLETAS	SMR>30	Ninguna
	30>SMR>10	Posible

Tabla 14: Magnitud de cada tipo de rotura en función del valor del SMR. Fuente: Romana, 1985.

CLASE	V b	V a	IV b	IV a	III b	III a	II b	II a	I b	I a
VALOR SMR	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
DESCRIPCIÓN	Muy mala		Mala		Normal		Buena		Muy buena	
ESTABILIDAD	Totalmente inestable		Inestable		Parcialmente inestable		Estable		Totalmente estable	
ROTURAS	Grandes roturas por planos continuos o por la masa		Juntas o grandes cuñas		Algunas juntas o muchas cuñas		Algunos bloques		Ninguna	
TRATAMIENTO	Reexcavación		Importantes		Sistemáticos		Ocasionales		Ninguno	

Tabla 15: Clasificación de la calidad y tipo de sostenimiento necesario para taludes en roca en función del valor del SMR. Fuente: Romana, 1985.

6. PREDICCIÓN DE INESTABILIDADES

La predicción temporal del suceso de rotura en taludes o laderas es un aspecto de difícil definición, sin embargo, existen diversas aproximaciones, en función de los parámetros considerados, que pueden agruparse en cuatro grandes grupos [18].

6.1. Métodos basados en la observación de movimientos

Estos métodos se basan en el principio de Skempton [19], que afirma que cualquier rotura producida tanto en suelo como en roca, suele estar precedida por deformaciones. Algunos autores han desarrollado modelos de rotura basados en el análisis de las deformaciones, que proporcionan una predicción temporal [20] o establecen la relación entre la velocidad de deformación y el tiempo [21]. Otros autores han analizado curvas de fluencia con el fin de determinar de forma matemática la deformación que desencadenará la rotura [22,23,24].

6.2. Métodos basados en la observación de las presiones intersticiales

Teniendo en cuenta que la presencia de agua es uno de los factores más determinantes en la estabilidad de taludes, estos métodos correlacionan la profundidad del nivel freático con el coeficiente de seguridad asociado al talud, ya que existe una relación directa del mismo con los movimientos de ladera. Sin embargo, estos métodos proporcionan información de la estabilidad a corto plazo, y son sólo aplicables a taludes de pequeñas dimensiones y que estén instrumentados. No son válidos para grandes extensiones de terreno ni para predicciones a largo plazo.

6.3. Métodos empíricos indirectos

Estos métodos se basan en la correlación, dentro de un mismo área, de deslizamientos ocurridos con los factores desencadenantes. Una correlación muy destacada es la que relaciona los deslizamientos con episodios de lluvia conocidos [25,26]. De esta forma, Romana (1992) [27] propuso unos umbrales para la formación de deslizamientos basados en la lluvia recogida durante 24 horas para diversas zonas climáticas de la Península Ibérica. Corominas y Moya (1999) [28] han encontrado los umbrales de lluvia necesarios para desencadenar deslizamientos superficiales y reactivar grandes deslizamientos en los Pirineos Orientales. También existen otros autores que correlacionan los deslizamientos con otros factores como el área de la cuenca vertiente y la pendiente de la ladera [29].

6.4. Métodos probabilísticos

Los métodos probabilísticos se basan en la información que ha sido registrada en el pasado para la determinación de la ocurrencia de deslizamientos. Para ello deben

realizarse series largas de deslizamientos basándose en un principio como puede ser la datación con radiocarbono [28], liquenometría [30], dendrocronología o daños observados en árboles causados por desprendimientos y corrientes de derrubios [28,31].

7. AUSCULTACIÓN DE TALUDES

El objetivo principal de la auscultación de taludes consiste en identificar las posibles inestabilidades presentes y obtener información acerca del comportamiento del terreno y de las características de los movimientos que se producen (velocidad, pautas de movimiento, situación de superficies de rotura, presiones intersticiales, etc.). Esta información permitirá aplicar los criterios de actuación más eficientes para cada situación.

Antes de planificar la instrumentación de un talud, es necesario estudiar las características y propiedades intrínsecas de este, ya que son los factores condicionantes que determinarán las posibles inestabilidades que puedan producirse. Para ello, debe realizarse un estudio previo que incluya observaciones de campo, toma de datos, ensayos de laboratorio, análisis de estabilidad, etc.

Una vez analizados estos factores, la correcta implementación de los métodos auscultación para cada caso, permitirá determinar el comportamiento y las características del terreno y predecir así su evolución frente a los factores desencadenantes que actúen sobre el talud. La planificación de la instrumentación deberá realizarse eligiendo las magnitudes que desean analizarse y la instrumentación necesaria para ello. Las magnitudes que suelen analizarse en los proyectos de auscultación son:

- Movimientos de apertura de grietas y entre bloques.
- Movimientos superficiales.
- Movimientos en el interior del terreno.
- Presiones intersticiales y sus variaciones.
- Medidas de presión y carga.

Para determinar el sistema de auscultación más eficiente para cada talud es necesario realizar una primera **Inspección Visual Directa**, lo que permitirá detectar todas las anomalías topográficas existentes, así como grietas, signos de rotura, orientación de las discontinuidades y su relación con la dirección e inclinación del talud, presencia de agua subterránea aflorante en superficie, etc.

Todas estas observaciones deben ser recogidas en mapas geológicos o fichas de control con el fin de determinar la instrumentación de auscultación más efectiva.

El proceso previo a la realización de la auscultación de un talud supone un coste económico, debido a la necesidad de personal que analice todos los factores mencionados. Por otro lado, muchos de los aparatos necesarios para llevar a cabo la propia instrumentación pueden alcanzar precios considerables, a lo que se debe añadir el coste de instalación y seguimiento de los datos recogidos. Debido al coste de este

proceso, los planes de auscultación únicamente suelen realizarse cuando las inestabilidades pueden suponer daños a personas, infraestructuras o edificaciones.

La frecuencia de realización de lecturas y toma de datos dependerá de la magnitud que se quiera medir y la velocidad de los procesos que puedan desarrollarse. Existen medidas de auscultación manuales y automáticas. Las medidas manuales son prácticas cuando se toman datos en intervalos de tiempo relativamente separados (semanas o meses) en puntos específicos y fácilmente accesibles, en el resto de los casos resulta más eficiente la toma de datos automática o monitorizada, aunque el coste es notablemente más elevado. En la *Figura 22* puede observarse un ejemplo de instrumentación geotécnica de un talud y de las estructuras colindantes.

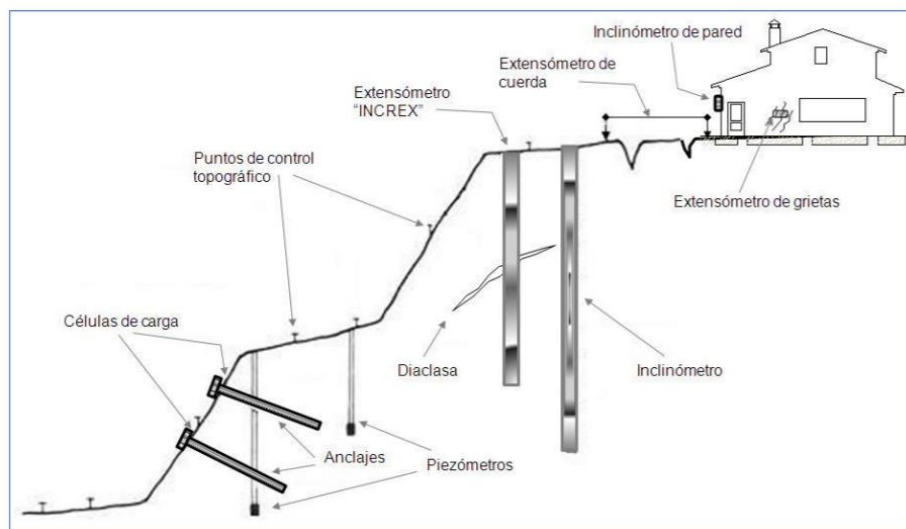


Figura 22: Esquema de instrumentación de un talud. Fuente: Oteo, 1978.

7.1. Movimientos de apertura de grietas y entre bloques

La medida de movimientos de apertura de grietas y entre bloques rocosos puede realizarse manualmente mediante el uso elementos mecánicos o mediante instrumentos automatizados a través de transductores eléctricos.

En la *Tabla 16* se resumen los diferentes sistemas de medición de apertura de grietas y entre bloques considerando los rangos y precisiones de medición que puede conseguir cada uno de ellos.

SISTEMA DE LECTURA	SENSOR DE MEDIDA	PRECISIÓN
Mecánicos	Cinta de convergencia	Para medidas > 2 m
	Cinta métrica	Baja (mm)
	Calibre	Media (0,1 mm)
	Flexímetro	Alta (0,001 mm)
Automáticos	Potenciómetro	Baja (cm)
	LVDT	Baja/media (mm)
	Extensómetro de cuerda vibrante	Alta (0,01mm)

Tabla 16: Sistemas manuales y automáticos de lectura de movimientos entre bloques. Fuente: Modificado de González de Vallejo, J.I., et. al., 2002.

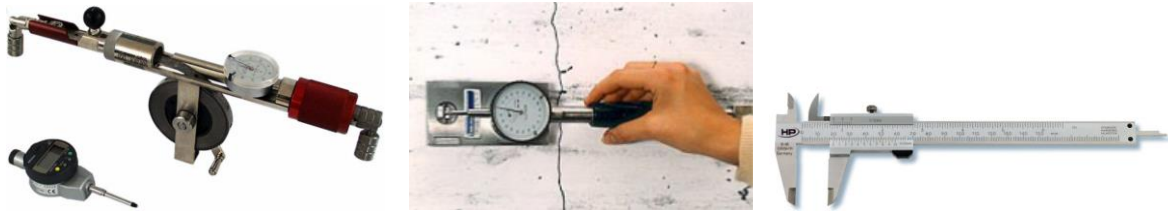


Figura 23: Sistemas mecánicos de medición de grietas: cinta de convergencia, flexímetro y calibre.
 Fuente: GIS Ibérica S.L, Corexval S.L., Diloy S.A.



Figura 24: Sistemas automáticos de medición de grietas: potenciómetro, LVDT, extensómetro de cuerda vibrante. Fuente: Geoteknik, Alpha-omega Electronics S.L, Grupo Iteico Euroamericano.

En la *Figura 25* puede observarse el esquema de funcionamiento de un extensómetro de cuerda vibrante. Estos aparatos permiten medir los desplazamientos del terreno en superficie y controlar la apertura y cierre de grietas en suelos, macizos rocosos y estructuras. Constan de un sensor de desplazamiento uniaxial capaz de recoger datos de variación de la longitud entre dos pernos o varillas ancladas en el terreno o en estructuras y unidos por un cordel de acero. Cada unidad extensométrica puede albergar dos o tres sensores que miden el desplazamiento lineal en la dirección del extensómetro con una precisión de $\pm 0,01$ mm.

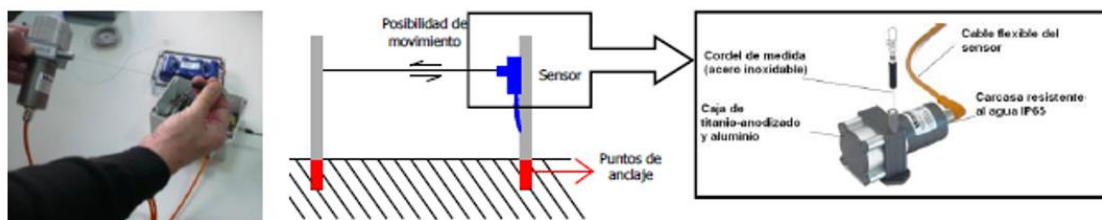


Figura 25: Funcionamiento de extensómetro de cuerda vibrante. Fuente: Oliva, González, A.O., 2015.

7.2. Movimientos en superficie

La medida de los desplazamientos tanto en superficie como en el interior del terreno permite detectar movimientos en una zona determinada o en todo el conjunto del talud y conocer la dirección y velocidad de este.

El control de la velocidad del movimiento permite conocer el modelo de comportamiento y, en ocasiones, predecir cuándo tendrá lugar la rotura en función del registro de la curva tiempo-desplazamiento.

Para la medida de desplazamientos entre puntos situados en la superficie del terreno se utilizan generalmente métodos topográficos, ejecutados mediante equipos ópticos o geodésicos. Para ello, es necesario establecer unas bases topográficas o de referencia conocidos que sean fijos y estén dentro de una zona estable que no experimente movimientos. Los métodos topográficos son ampliamente utilizados debido a su gran sencillez de operación, versatilidad y economía.

7.2.1. Topografía convencional

Se trata del método tradicionalmente más utilizado para determinar movimientos laterales y verticales de los taludes y de las estructuras en sus inmediaciones. Para ello es necesario colocar bancos de nivel (BM) en puntos fijos que no se conozca que no van a sufrir movimientos debido a la inestabilidad del talud y puntos de medición en los lugares donde se prevé que se producirá el movimiento. De esta forma, las medidas de los puntos móviles se referencian de forma relativa a los BM fijos, que deben estar situados en coordenadas conocidas.

Después de realizar varios ciclos de medición, será posible dibujar una planta topográfica en la que podrá representarse el movimiento de cada punto controlado por un vector. El conjunto de todos los vectores proporciona una idea objetiva del movimiento y velocidad de la masa de suelo o roca inestable. Es importante tener en cuenta que, para que estas mediciones sean precisas, la toma de datos debe ser realizada siempre con el mismo equipo y por el mismo topógrafo, y que los puntos de control deben permanecer siempre en una zona estable que no sufra ningún tipo de movimiento. Existen diferentes métodos para llevar a cabo la adquisición de medidas:

- **Métodos geodésicos:** se utilizan para la medición de movimientos verticales y horizontales con una precisión centimétrica. Existen tres sistemas diferentes:
 - Triangulación: medición de ángulos a partir de dos o más bases fijas.
 - Trilateración: medición de distancias a partir de tres o más bases fijas.
 - Poligonación: medición de ángulos y distancias a partir de tres o más bases fijas.
- **Nivelación:** únicamente permite medir movimientos verticales, sin embargo, las precisiones obtenidas son mucho mayores que mediante los métodos geodésicos, del orden de hasta 1 mm para distancias de 1 km. Para realizar la medición es necesario disponer de bases de referencia fijas en el terreno, pero la lectura y tratamiento de los datos es rápida y simple.
- **Colimación:** permite controlar los movimientos producidos a partir de una recta proyectada entre un punto fijo y la estación topográfica. Para la aplicación de esta técnica es necesario disponer de una estación topográfica, una mira fija y una mira móvil. La mira fija se instala en un extremo y la mira móvil es la que detecta los movimientos horizontales que haya sufrido la estructura a controlar. Este método permite controlar movimientos de orden milimétrico, y el tratamiento y análisis de los datos es rápido y sencillo, pero debe tenerse en cuenta que los movimientos a medir deben encontrarse en un plano perpendicular al plano vertical de colimación que se mantiene fijo.

Método de control		Sistema de medida	Observaciones
Geodesia	Triangulación	Medida de ángulos	<ul style="list-style-type: none"> Mediciones en las 3 dimensiones Precisión media (cm) Lectura y toma de datos laboriosa Requiere personal especializado
	Trilateración	Medida de distancias	
	Poligonación	Medida de ángulos y distancias	
Nivelación		Medida de movimientos verticales	<ul style="list-style-type: none"> Precisión alta (1 mm) Distancias de hasta 1 km Toma de datos sencilla
Colimación		Medida de movimientos horizontales de puntos de control respecto un plano vertical	<ul style="list-style-type: none"> Precisión muy alta (mm) Toma y tratamiento de datos rápido y sencillo Limitado a movimientos horizontales perpendiculares al plano de colimación

Tabla 17: Tabla resumen de lo métodos de control topográfico. Fuente: Propia.

7.2.2. Sistema GPS

El sistema GPS (Global Positioning System) utiliza las señales emitidas por los satélites para determinar la posición del punto de medición tanto en el plano horizontal como en el vertical. Este sistema cuenta con tres componentes:

- **Componente espacial:** formado por un mínimo de 24 satélites situados a unos 20.200 km de la Tierra, con planos orbitales inclinados 55° respecto al Ecuador. Estos satélites están distribuidos de forma que haya siempre, por lo menos, cuatro satélites visibles desde cualquier punto del planeta. Cada satélite lleva a bordo varios relojes atómicos de gran precisión y emiten constantemente una señal característica que contiene información diversa como por ejemplo su situación.
- **Componente de control:** estaciones de control situadas cerca del Ecuador encargadas de controlar la posición orbital de los satélites, calibrar y sincronizar sus relojes.
- **Receptor GPS:** realizan dos tipos de medidas a partir de las ondas captadas de los satélites, las pseudodistancias de código y medidas de fase de la onda portadora. La pseudodistancia es la medida de la distancia entre el satélite y el receptor, que se obtiene multiplicando el tiempo de transmisión de la señal por la velocidad de la luz. La observable de la fase es la diferencia entre la fase de la portadora recibida del satélite y la fase generada internamente por el oscilador del receptor.

Para determinar la posición geográfica del punto en el que se encuentra, el receptor GPS localiza, de forma automática, un mínimo de cuatro satélites de la red, de los que recibe sus señales características; la identificación, la hora del reloj de cada uno y la información sobre la constelación. A partir de estas señales, el receptor sincroniza su propio reloj con el tiempo del sistema GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, lo que le permite determinar su distancia al satélite y, aplicando el método de trilateración inversa, las coordenadas de su propia posición.

Los principales errores que influyen en la precisión del resultado obtenido son debidos a los siguientes factores [32]:

- Los relojes de los satélites y la desviación de la órbita, que deben resolverse desde el control de tierra.
- La transmisión de las señales a través de la ionosfera. Este error puede resolverse considerando que la pérdida de velocidad de las ondas de radio a través de ella es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia empleada.
- La transmisión de las señales a través de la troposfera, prácticamente imposible de corregir.
- Los ruidos de los receptores, determinados por la calidad de los mismos.
- El efecto multitrayectoria, producido por la reflexión sobre determinados obstáculos de las señales satélites antes de llegar al receptor. Este error puede evitarse tomando las precauciones adecuadas y estudiando la trayectoria de las ondas.
- La incertidumbre geométrica, debida a la posición relativa de los satélites utilizados para la determinación de la posición. Este error se minimiza eligiendo los satélites más adecuados para cada situación.

El sistema **GPS Diferencial (DGPS)** utiliza estaciones de referencia de posición conocida en la Tierra para eliminar los errores inducidos mediante el método GPS tradicional. Para ello determina la posición de las estaciones de referencia a través del sistema GPS y transmite al receptor las correcciones necesarias para igualar el valor de la posición calculada a la posición conocida. Estas correcciones serán aplicables al resto de posiciones calculadas a través del mismo sistema satelital, lo que permite al sistema DGPS conseguir una mayor precisión en la determinación de las coordenadas exactas del resto de puntos calculados.

Las principales aplicaciones del sistema DGPS al control de movimientos son [33]:

- Control de estructuras: puentes, presas y diques de control, torres y rascacielos, plataformas petrolíferas, tuberías, etc.
- Fenómenos naturales: deslizamientos de laderas, subsidencias del terreno, terremotos, etc.

La técnica DGPS está siendo aplicada con mucho éxito para el control de los movimientos superficiales en taludes. Para ello debe posicionarse una estación base en un punto de coordenadas conocidas, que se utilizará para realizar correcciones y refinamientos de una o varias estaciones móviles que utilizan el mismo sistema satelital. De esta forma, los desplazamientos de los puntos de un deslizamiento se obtienen por diferencia de coordenadas, medidas en diferentes instantes de tiempo.

En condiciones óptimas, estos sistemas consiguen mediciones con precisiones de orden centimétrico (V: 20 mm, H: 10 mm) y mediante el filtrado matemático de los datos, es posible ajustar las posiciones a la velocidad observada de movimiento, en función de las posiciones anteriores, permitiendo alcanzar una exactitud milimétrica en oscilaciones de baja frecuencia [34]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la presencia de elementos que puedan interferir con la señal satélite, tales como árboles, estructuras como túneles o puentes, condiciones climáticas adversas, etc. pueden disminuir notablemente esta precisión.

7.2.3. Inclínometro biaxial

El inclínometro biaxial o de pared permite detectar la inclinación o el basculamiento de las estructuras o elementos en los que se instalan. Son denominados biaxiales porque poseen dos canales de medida para el cálculo de la inclinación en los ejes X e Y.

La tecnología se basa en el principio de conductividad, por lo que mide la inclinación a través del nivel de conductividad que hay entre los electrodos y, mediante un microprocesador, linealiza y compensa las desviaciones de la señal. Están diseñados para aplicaciones que requieren una alta precisión y baja deriva térmica. Existe una gran variedad de aparatos en función de la precisión y el rango de medición requeridos, algunos de ellos proporcionan resoluciones de lectura de hasta $0,0001^\circ$.

Suelen utilizarse para monitorizar la pérdida de verticalidad en elementos estructurales debido a diversas causas entre las que se encuentran los movimientos del terreno.



Figura 26: Inclínómetros biaxiales de diferentes rangos de medición. Fuente: Intec S.L., Sensing S.L.

7.3. Desplazamientos profundos

El objetivo de estas mediciones es localizar movimientos el interior del terreno y determinar el origen de las inestabilidades.

Estos sistemas y dispositivos de instrumentación permiten el control de desplazamientos del terreno en diferentes profundidades; ya sean verticales (Δz) u horizontales (Δx , Δy).

Los movimientos en profundidad suelen medirse en el interior de sondeos o pozos mediante la utilización de inclínómetros, extensómetros u otros dispositivos. Además de ser útiles para la medida de la velocidad y dirección del movimiento, estos sistemas permiten localizar las superficies de rotura.

7.3.1. Inclínómetros

Los inclinómetros son la herramienta más utilizada para localizar movimientos perpendiculares a un sondeo e investigar la localización y geometría de las superficies de deslizamiento. Existen dos formas de llevar a cabo la medición de los desplazamientos; de forma semi-automática, mediante la sonda inclinométrica clásica, y de forma totalmente automática utilizando un inclinómetro fijo.

- **Sonda inclinométrica**

Para realizar las mediciones es necesaria la ejecución de un sondeo en el que se instala un tubo guía que permite el desplazamiento de la sonda inclinométrica. Esta sonda transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación en cada punto de medición. Deben realizarse varias mediciones en diferentes puntos y a lo largo de un periodo de tiempo, de modo que la diferencia entre las medidas permitirá localizar y cuantificar movimientos en el interior del terreno en dos planos perpendiculares al sondeo.

La sonda inclinométrica se introduce en el interior del sondeo mediante un cable de control graduado que permite la toma lecturas cada 0.5 m a lo largo de toda la tubería. La primera campaña de lecturas realizada proporciona los valores de referencia que serán utilizados para el cálculo de los movimientos absolutos a partir de la diferencia obtenida respecto a las siguientes lecturas. La periodicidad de las lecturas se determinará en función a la velocidad del movimiento que se desee analizar. En cada campaña de lectura, se obtienen los desplazamientos acumulados desde el punto más profundo del sondeo hasta la superficie, de forma que se obtiene el desplazamiento horizontal acumulado en la cabeza del sondeo.

Es importante tener en cuenta que, para que los movimientos calculados puedan considerarse absolutos, los primeros puntos de medición situados en el fondo del sondeo deben estar fuera de la superficie de terreno movilizada, es decir, por debajo de la superficie de rotura.

La medición de desplazamientos en profundidad mediante inclinómetros permite determinar:

- Profundidad de movimientos de deslizamiento.
- Localización y forma de la superficie de rotura.
- Espesor de la zona de corte.
- Cantidad de material movilizado en el desplazamiento.
- Velocidad del movimiento y su variación debido a condiciones climáticas u otros factores.
- Dirección del movimiento.

Los elementos que componen el sistema de medición mediante el equipo de sonda inclinométrica son:

- Tubo guía de plástico, acero o aluminio anodizado instalado en el interior del sondeo o perforación. Este tubo cuenta con unas ranuras longitudinales que sirven de guía para orientar el sensor. Los diámetros de tubo normalmente son de entre 1.5 y 3.5 pulgadas.

- Sensor portátil instalado sobre un sistema de ruedas que permiten su desplazamiento sobre la guía del tubo. El inclinómetro lleva incorporados dos servoacelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del aparato.
- Cable de control que permite bajar y subir el sensor a través del tubo guía y transmite las señales eléctricas a un lector en superficie. Este cable suele estar graduado con el fin de medir la profundidad desde la superficie y contiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones. Los cables eléctricos se encuentran unidos al núcleo y espaciados a su alrededor. La cubierta del cable está realizada en neopreno lo que permite su estanqueidad y flexibilidad. El cable se maneja desde la superficie mediante una polea con unas tenazas para sostenerla, lo que evita que el cable pueda torcerse al sostenerlo.
- Sistema de lectura instalado en superficie que recibe las señales eléctricas y muestra el resultado de las lecturas. El sistema de lectura funciona también como proveedor de energía al equipo y, en ocasiones, puede almacenar y procesar los datos recogidos. Se trata de un equipo compacto y sellado contra la humedad que puede guardar hasta 40 mediciones completas.

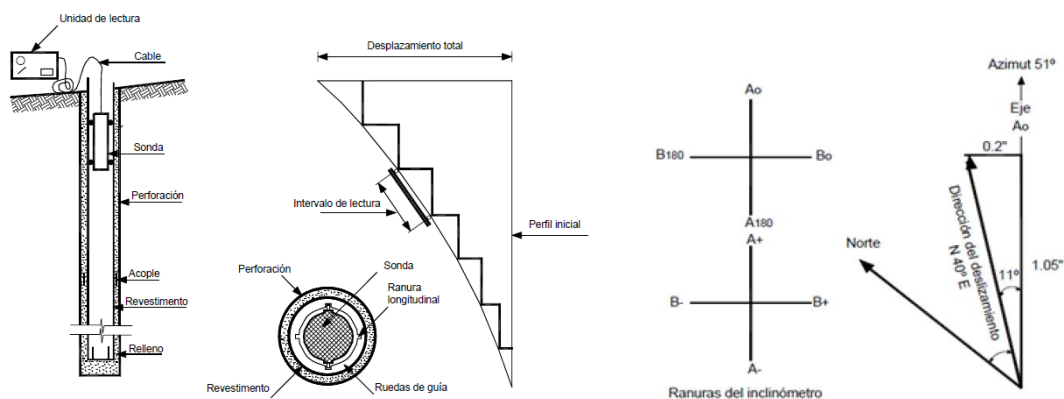


Figura 27: Esquema de un equipo de inclinómetro y dirección de ranuras de medición. Fuente: Suárez, J., 2012.

Generalmente, los inclinómetros se utilizan para localizar superficies de rotura en el interior del terreno, sin embargo, también pueden instalarse dentro o junto a pilotes existentes en el terreno para medir la deflexión que sufren debido a un deslizamiento y determinar los momentos de flexión a los que están sometidos.

La gran desventaja de este sistema de medición es que su vida útil no suele superar los 10 o 20 cm de translación del tubo, ya que la deformación sufrida impide el paso del torpedo o puede provocar que se quede atascado y sea dañado. De esta forma, cuando las deformaciones en el tubo empiezan a ser considerables, antes de realizar las mediciones es recomendable introducir un falso torpedo para comprobar el estado de la tubería.

La precisión del inclinómetro depende del tipo de sensor utilizado, generalmente, los inclinómetros pueden medir deformaciones de 1.3 a 2.5 mm, en una longitud de 33 metros, equivalente a una precisión 1:10.000.

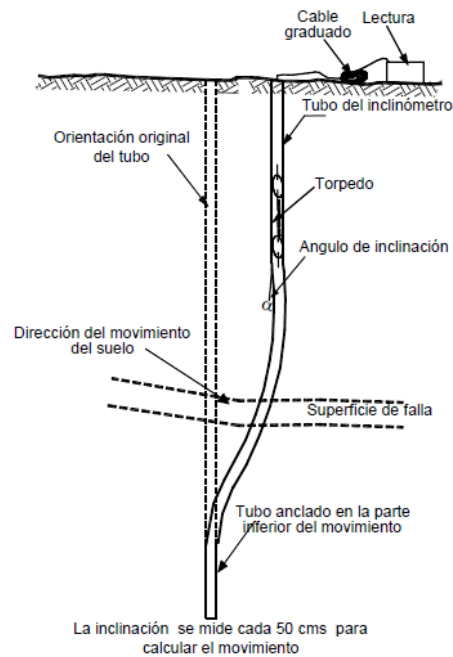


Figura 28: Esquema del desplazamiento de un inclinómetro. Fuente: Abramson et. al., 2002.



Figura 29: Inclinómetro instalado en el Eix Transversal de la C-25 (Cataluña) para localizar la superficie de deslizamiento que se está produciendo en el terraplén sobre el que se ejecutó el desdoblamiento de la carretera. Fuente: Toma propia.

- **Inclinómetro fijo**

El inclinómetro fijo o “in situ” es una modificación de la sonda inclinométrica clásica con el fin de automatizar la medida de los desplazamientos laterales en suelos, rocas y estructuras y poder así, obtener información en tiempo real.

Este sistema cuenta con uno o más servo-acelerómetros o sensores electrolíticos protegidos por una cubierta de acero inoxidable hermética de unos 32 mm de diámetro, lo que permite su desplazamiento a través de los tubos guías convencionales utilizados para las sondas inclinométricas. Cada sensor está separado del siguiente por barras de acero inoxidable con ruedas, sin embargo, todo el conjunto está conectado por un sistema de bus digital que consiste en un solo cable que se extiende a lo largo de toda la cadena de sensores conectados. Las longitudes de varilla pueden variar para modificar la longitud total del equipo y los sensores pueden concentrarse en áreas donde se prevea que va a suceder el movimiento.

Al igual que los sistemas inclinométricos clásicos, los inclinómetros fijos se utilizan para localizar movimientos horizontales (Δx , Δy) a diferentes profundidades en el interior del sondeo.

Normalmente, antes de instalar un inclinómetro fijo en un sondeo, deben realizarse mediciones utilizando un sistema inclinométrico convencional con el fin de localizar las profundidades preferentes de movimientos dentro del terreno y así concentrar los sensores fijos en los puntos donde quiera realizarse la monitorización.

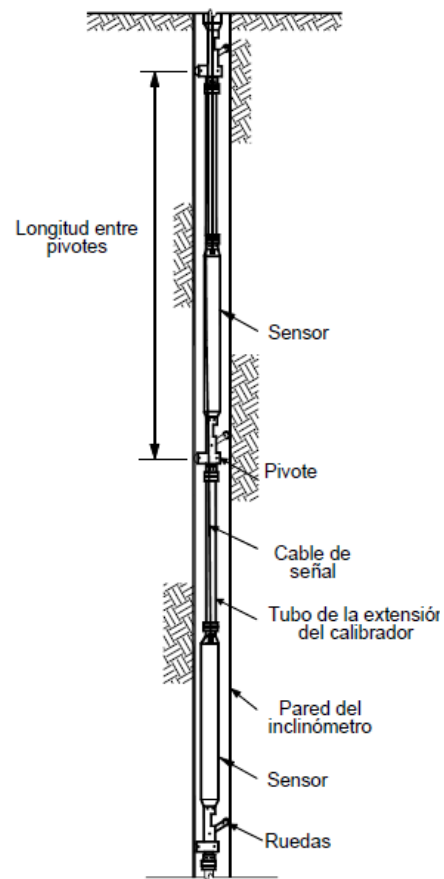


Figura 30: Esquema de funcionamiento de un inclinómetro fijo.
 Fuente: Slope Indicator Co.

Las principales ventajas de estos sistemas son [35]:

- Las ruedas del torpedo permanecen siempre a la misma profundidad exacta.
- La posición de los sensores no varía con el tiempo.
- Se eliminan los problemas de cambio de temperatura.
- Permiten una monitorización permanente y continua.
- Algunas referencias de inclinómetros fijos son mucho más precisas que las obtenidas mediante inclinómetros tradicionales.
- Los inclinómetros fijos pueden retirarse ocasionalmente para realizar otras mediciones, para confirmar la información obtenida o para instalarlos en una localización diferente.
- El número de varillas y su longitud puede variar en función de los requisitos de medición.
- Funcionan como un sistema de alarma inmediata de acuerdo con la actividad del movimiento.

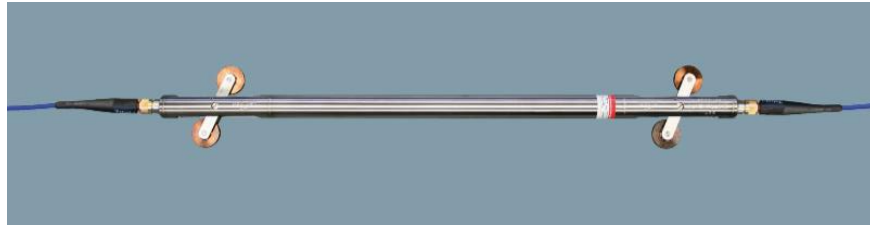


Figura 31: Imagen de un módulo de un Inclínómetro fijo. Fuente: RST Instruments Ltd.

La principal limitación de estos sistemas es que existe la probabilidad de pérdida o daño del equipo en casos de fuertes movimientos o cuando la superficie de falla es muy delgada. Sin embargo, debido a la posibilidad de monitorización del movimiento en tiempo real, es posible prever el momento en el que la tubería llegue al punto máximo de deformación que impida extraer el equipo.

7.3.2. Extensómetros

Los extensómetros se utilizan para medir movimientos relativos entre un punto fijo instalado en la boca del sondeo o en una sonda móvil y otros puntos situados en el interior del mismo, anclados solidariamente al terreno. De esta forma, los movimientos del terreno se transforman en desplazamientos de los puntos de anclaje, que se transmiten al emboquille mediante hilos o varillas y pueden medirse mecánicamente o mediante transductores eléctricos instalados en la boca de la perforación.

- **Extensómetro magnético o sonda extensométrica.**

Se trata de una sonda móvil capaz de tomar medidas de deformaciones de alta precisión en el sentido longitudinal de un sondeo, permitiendo así la medida de los movimientos verticales en sus inmediaciones. Al igual que en caso del inclinómetro, es necesario que el sondeo sea entubado con una tubería de material plástico (ABS), con unas guías que encajen la sonda y permitan su movimiento a través del sondeo. Sin embargo, en este caso, la tubería lleva acoplados unos anillos magnéticos o de bronce en su parte externa espaciados en intervalos de 1 m.

El espacio que queda entre la pared del sondeo y la tubería debe rellenarse con un mortero de agua y cemento, de consistencia similar a la del terreno, de forma que se garantice un anclaje solidario entre ambos y cualquier movimiento del terreno sea transmitido a la tubería.

La sonda está equipada con unas bobinas electromagnéticas de alta precisión que permiten detectar las variaciones de posición entre los anillos de la tubería, en base a las inducciones electromagnéticas producidas. La comparación de las medidas registradas a lo largo del tiempo proporciona perfiles de asientos o levantamientos producidos en el terreno.

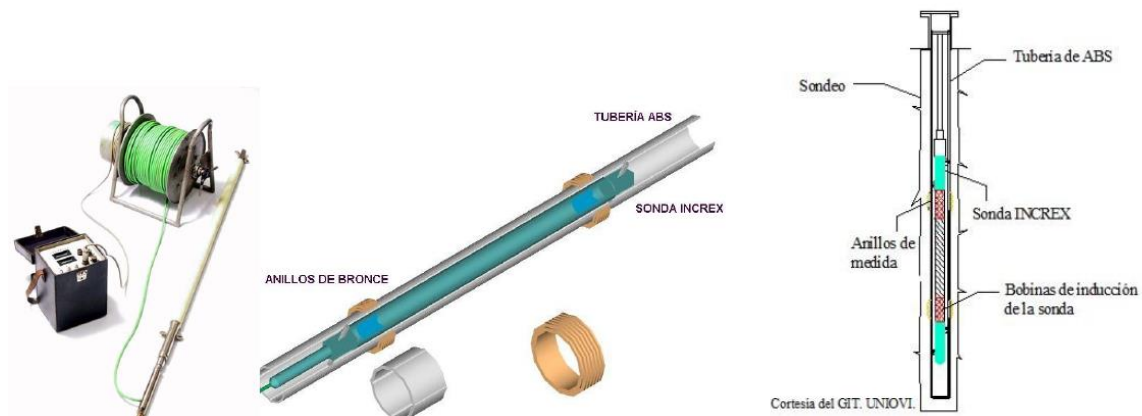


Figura 32: Imagen y partes que forman una sonda extensométrica. Fuente: INCREX Systems.

- **Extensómetro fijo**

Los extensómetros fijos son dispositivos instalados de forma permanente en el interior de un terraplén o sondeo para el monitoreo preciso de asentamientos o levantamientos del terreno sin necesidad de utilizar una sonda móvil.

Para la medida en el interior de un sondeo, el equipo consiste en un anclaje de acero, que se debe hincar en terreno competente, unido a una varilla de medición vertical cubierta por un tubo anti-fricción corrugado que, junto con unos tapones situados en sus extremos, evitan las fuerzas de tracción sobre la varilla.

En el caso de medida de asientos en terraplenes, en lugar de un anclaje se utiliza una placa de acero galvanizada instalada en la base del terraplén.

La medida del desplazamiento relativo entre el punto de anclaje y la varilla de medición puede realizarse mediante el control topográfico del tope de la varilla en superficie, o de forma automática mediante el uso de transductores de movimiento conectados a lectores de datos.

Las principales aplicaciones de estos dispositivos son:

- Asentamientos en terraplenes formados por materiales blandos.
- Mediciones directas de asentamientos o levantamientos en la superficie del terreno.
- Monitoreo de las deformaciones alrededor de excavaciones subterráneas.

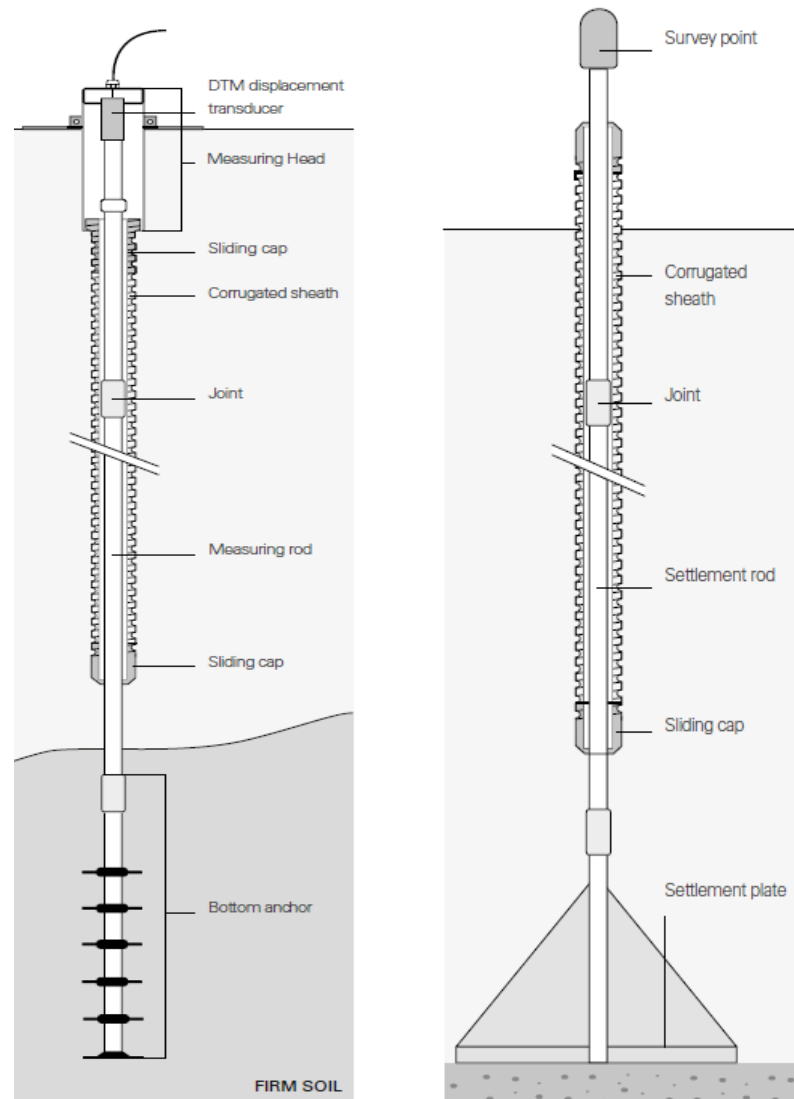


Figura 33: Extensómetro fijo de medida automática para movimientos del terreno en superficie (izquierda) y extensómetro fijo de medida óptica para asentamientos en terraplenes (derecha). Fuente: Sisgeo S.r.l.

- **Extensómetro de varillas**

Los extensómetros de varillas se emplean tanto en suelos como en rocas para controlar los movimientos en profundidad de uno o varios puntos de medición instalados a diferentes cotas. La instalación puede realizarse mediante la perforación de un sondeo hasta la profundidad deseada o puede instalarse en paralelo a la ejecución de un terraplén que desee controlarse durante o después de la fase de construcción.

El sistema consta de un conjunto de varillas ancladas a diferentes profundidades en el interior de un tubo telescópico que se instala en el terreno. El tubo se rodea con una lechada de cemento de resistencia similar a la del terreno para que se transmitan las deformaciones.

El anclaje de las varillas puede ejecutarse de diversas formas, aunque el método más común es la inyección. Las varillas se llevan hasta la superficie del sondeo acoplando cuantos tramos sean necesarios, consiguiendo medidas de 2 a 40 m de profundidad.

La medida de la variación de la distancia entre la cabeza de la varilla anclada en profundidad y el punto de medida en la superficie se realiza mediante transductores de desplazamiento de cuerda vibrante o comparadores eléctricos.

Estos dispositivos son capaces de determinar el movimiento relativo del terreno con una precisión de $\pm 0,01$ mm. La lectura se realiza mediante la unidad de lectura de sensores de cuerda vibrante o mediante un equipo de registro de datos.

El punto de medida debe protegerse, asegurando la estanqueidad, del polvo y del agua, de lo contrario pueden producirse errores en la medida debido al mal acoplamiento entre la cabeza de la varilla y el lector correspondiente

Las principales aplicaciones de los extensómetros de varillas son:

- Control de deformaciones del macizo a diferentes profundidades debido a la excavación de túneles.
- Control de asentamientos en superficie o movimientos del terreno ante excavaciones por debajo del extensómetro o ante cargas (tierras, estructuras, etc.) sobre el extensómetro.

Normalmente este equipo se utiliza para la medida de movimientos verticales en el terreno, sin embargo, es posible colocarlo horizontalmente para el control de movimientos horizontales. Este tipo de medidas suele realizarse para controlar deformaciones del terreno debido a la excavación de túneles. En estos casos será necesario proteger las varillas ante la flexión que puedan sufrir debido a su propio peso.

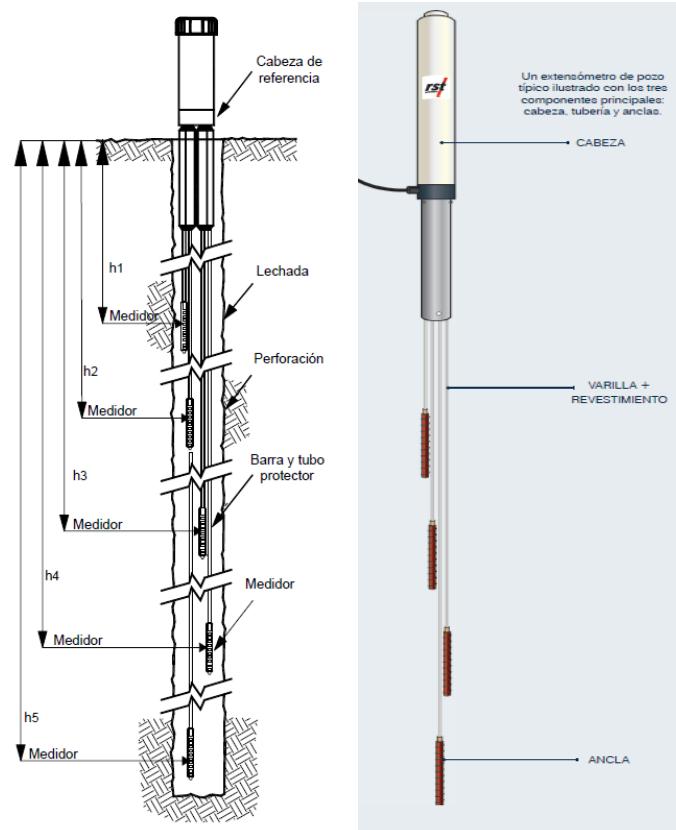


Figura 34: Esquema e imagen de un extensómetro de varillas. Fuente: Abramson et. al, 2002, RST Instruments Ltd.

- **Extensómetro vertical o de cable**

Los extensómetros de cable permiten medir movimientos horizontales del terreno a profundidades que pueden llegar hasta 60 m. Estos extensómetros resultan muy útiles para movimientos mayores a 10 o 20 cm, ya que con tal magnitud de deformación no es posible el uso de inclinómetros.

El sistema consiste en un cable de acero envainado de longitud conocida que se ancla en el fondo del sondeo por debajo de la superficie de deslizamiento del talud. El cable se mantiene tenso mediante un sistema de contrapeso y polea, de la cual se registra el giro mediante un potenciómetro, lo que permite medir el aumento o disminución de la longitud del cable. Este sistema permite mantener un registro continuo de grandes deformaciones.

Hay que tener en cuenta que la variación aparente de la longitud del cable no corresponde a la magnitud de translación de la ladera, ya que existe una primera fase del movimiento de forma no lineal e incluso negativa que depende de la profundidad, ángulo y abertura de la superficie de rotura, del diámetro del sondeo y de su deformación en la zona de deslizamiento [36].

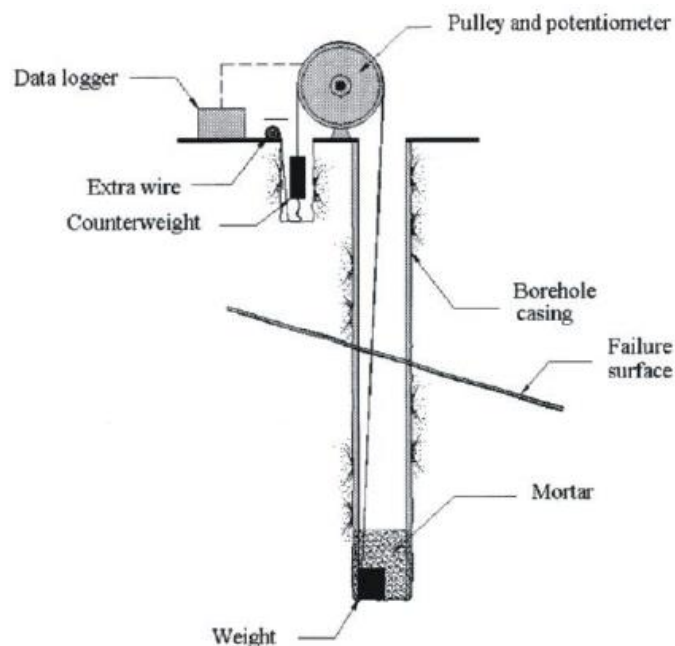


Figura 35: Esquema de un extensómetro de cable. Fuente: Gili Ripoll J.A, 2003.

7.3.3. Tiras de cortante

Consiste en un circuito eléctrico diseñado con una serie de resistores montados en paralelo sobre una cinta frágil, que se inserta en el terreno a una determinada profundidad a través de una perforación. Cuando se produce un desplazamiento en el interior del terreno la tira se corta, y el valor de la resistencia eléctrica registrada varía de forma proporcional a la profundidad a la que rompe.

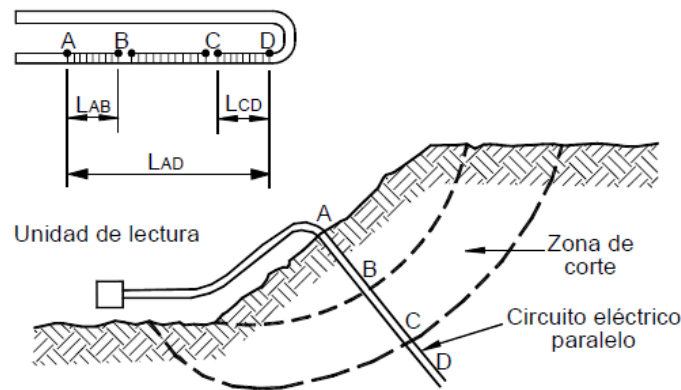


Figura 36: Esquema de funcionamiento de las tiras de cortante. Fuente: Dumnicliff, 1988.

7.3.4. Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

La instrumentación mediante reflectometría consiste en la medición de las reflexiones en el voltaje, a partir de un pulso eléctrico que viaja a través de un cable coaxial.

Este método puede emplearse para la detección de deslizamientos en el interior del terreno. Para ello, se instala un cable coaxial en el interior de una perforación que, posteriormente es rellenada con una lechada de agua y cemento de consistencia similar a la del terreno. El cable coaxial se ve afectado por las deformaciones en cortante y tensión causadas por el deslizamiento de la masa de suelo o roca, que provocan una variación en su impedancia y, por lo tanto, de la señal reflejada.

Una vez se determina la existencia de un deslizamiento debido a la variación de la señal de las ondas reflejadas sobre el cable, mediante el uso de un reflectómetro tipo TDR, es posible determinar el punto exacto donde ha variado la impedancia a lo largo del cable y por tanto, el lugar donde se ha producido la flexión del mismo.

Las principales ventajas de este método son la facilidad y rapidez de medición y su bajo coste comparado con otros instrumentos de auscultación.

Las principales limitaciones consisten en que no permite determinar la dirección y magnitud de los movimientos y que únicamente detecta esfuerzos a cortante, por lo que no es capaz de detectar roturas por vuelco.

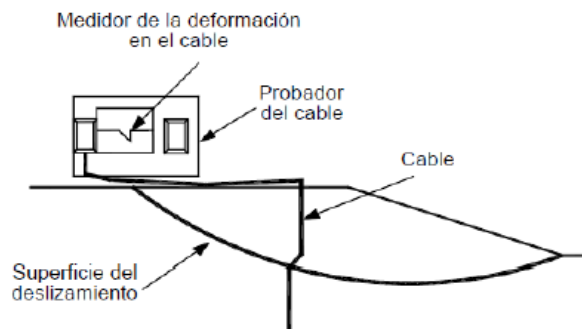


Figura 37: Esquema de funcionamiento del TDR. Fuente: Abramson et., al, 2002.

7.4. Medida de presiones intersticiales

La medida de las presiones intersticiales en el interior del talud se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetros en sondeos o pozos de reconocimiento. Existen diferentes tipos de piezómetros de lectura manual o automática que se utilizarán según el caso de estudio con diferentes características de funcionamiento y precisión, aunque la mayoría de los piezómetros trabajan con el mismo principio, que consiste en equilibrar mediante algún tipo de contrapresión, el empuje que ejerce el agua en el interior del terreno al actuar sobre una unidad sensible.

7.4.1. Tubería piezométrica ranurada

La tubería piezométrica ranurada consiste en una tubería de PVC ranurada y abierta en sus dos extremos. Esta tubería se instala a lo largo de un sondeo y, mediante la introducción de una sonda se mide el nivel del agua en su interior. El nivel del agua medido en el interior del sondeo corresponde a la profundidad del nivel freático, y en caso de que el terreno consista en un acuífero libre, en régimen estacionario, de alta permeabilidad, homogéneo e isótropo corresponderá a su vez a la altura piezométrica.

El control y medición del nivel del agua es muy importante tanto durante la perforación, como su evolución a lo largo del tiempo, ya que permite obtener información sobre el tipo de acuífero y su influencia sobre la permeabilidad y otros factores del terreno.

La precisión de este tipo de sistemas es generalmente buena, sin embargo, debido a que la perforación está en contacto con todos los estratos que constituyen el terreno, no es posible determinar la presión del agua en una profundidad determinada, el nivel del agua obtenido representa el pico de presión en la zona más permeable, lo que puede inducir a errores en el análisis.

Este tipo de piezómetro es muy útil para medir el nivel freático en terrenos permeables, ya que en terrenos poco permeables el tiempo de respuesta puede ser bastante largo. Otra limitación de este método es que los movimientos grandes en el interior del terreno pueden dañar el tubo e imposibilitar la toma de medidas.

7.4.2. Piezómetro de cabeza abierta

El piezómetro abierto consiste en una tubería ranurada en su extremo inferior que se utiliza para medir la altura piezométrica en un tramo determinado de un sondeo.

Para la toma de medidas, se utilizan tapones bentoníticos para aislar un tramo del sondeo, y se instala en su interior una tubería ranurada abierta en su extremo superior. De esta forma es posible medir las variaciones del nivel freático en el tramo aislado.

Este tipo de piezómetro corresponde al clásico piezómetro de Casagrande, que consiste en un cilindro poroso de cerámica unido con un manguito de caucho conectado a un tubo de plástico. Las versiones modernas están constituidas por un elemento poroso de polietileno de alta densidad unido a un tubo de PVC o ABS.

Al igual que en el caso del piezómetro ranurado, el piezómetro abierto es útil para la medida de presiones intersticiales en terrenos permeables, ya que el tiempo de respuesta en terrenos poco permeables puede ser bastante elevado y los movimientos grandes en el interior del terreno pueden dañar el tubo e imposibilitar las mediciones.

Este tipo de piezómetros suelen ser considerados muy precisos y confiables. Algunas de sus ventajas más destacables son [38]:

- Son simples y fáciles de interpretar.
- Poseen alta durabilidad y fácil mantenimiento.
- Pueden utilizarse unidades de medida portátiles.
- Permiten el muestreo del nivel freático y la medición de la permeabilidad del suelo.

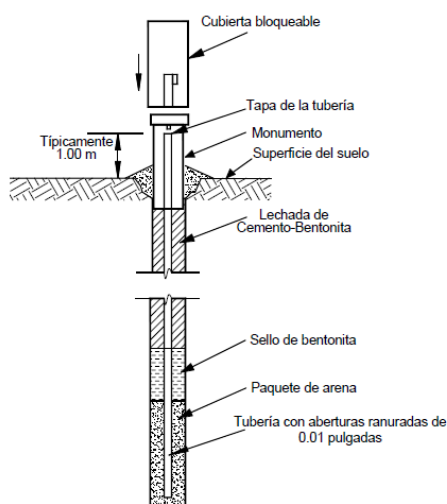


Figura 38: Esquema de funcionamiento e imagen de un piezómetro abierto tipo Casagrande. Fuente: Cornforth (2005), Sigeo S.r.l.

7.4.3. Piezómetro cerrado

El piezómetro cerrado consiste en un transductor instalado en un tramo aislado dentro de un sondeo que registra las lecturas de presión intersticial en un punto y lo transmite a una unidad de lectura situada en el exterior del sondeo.

Este tipo de equipos se utiliza sobre todo en terrenos de baja permeabilidad, ya que poseen un corto tiempo de respuesta, y permiten la medida con gran precisión de las presiones intersticiales en varios niveles dentro del mismo sondeo.

La variación de las presiones en el punto de instalación es registrada por un transductor puede ser de tres tipos:

- Neumático: indicado para distancias menores a 200 m. No permite la automatización del proceso.
- De resistencia eléctrica: permite automatización, pero pierden precisión con las variaciones de temperatura.
- De cuerda vibrante: permiten transmitir la señal a distancias mayores de 1000 metros sin pérdidas de precisión.

Los piezómetros cerrados permiten la medición de presiones intersticiales en varios puntos del sondeo y sufren una menor afectación por los posibles movimientos del terreno que los abiertos, sin embargo, suponen un coste notablemente mayor.



Figura 39: De izquierda a derecha imágenes de transductores y piezómetros eléctricos, piezómetro neumático y de cuerda vibrante. Fuente: SISGEO S.r.l., ITMSOIL.

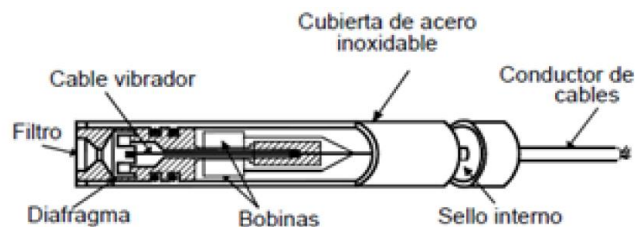


Figura 40: Esquema de funcionamiento del sensor de cuerda vibrante. Fuente: Suárez, 2012.

7.4.4. Piezómetro-Lápiz

Los piezómetros lápiz representan la tecnología más avanzada en lo que respecta a medidas piezométricas. Están constituidos por sondas con memoria tipo USB, que se introducen en el sondeo sujetadas por un cable de acero. El propio sensor toma los datos de forma automática, por lo que basta con conectar el sensor a un ordenador y descargar la información recogida.

Actualmente, las lecturas de la mayoría de los piezómetros, transductores y sondas piezométricas pueden realizarse de manera continua a través de centrales de captación y transmisión de datos como la que se puede observar en la siguiente figura.



Figura 41: Piezómetro tipo lápiz conectado a una central de captación y transmisión de datos. Fuente: Oliva González, A. O., 2015.

7.5. Medida de presiones

Otro factor importante a la hora de controlar la estabilidad de un talud son las presiones existentes debidas a cargas o empujes tanto del terreno como de las estructuras.

7.5.1. Ensayo de presiometría

Los ensayos de presiometría consisten en ensayos de carga realizados “in situ” que aprovechan las perforaciones de los sondeos con el objetivo de conocer la relación tensión-deformación en el terreno circundante.

El proceso consiste en introducir una sonda cilíndrica en el interior de un sondeo hasta la zona que se desea analizar y, mediante una bomba hidráulica, se aplica presión a un fluido en el interior de una camisa elástica que provoca una expansión gradual de la sonda. A través de un lector digital, se obtiene un registro de las presiones ejercidas y los desplazamientos que se producen en los calibres de la sonda para cada una de estas presiones.

Hay que tener en cuenta que, para la realización de un ensayo de presiometría, es necesario que el diámetro del sondeo sea regular en toda su extensión y que no haya rugosidades ni rebabas en sus paredes, ya que podrían dañar el equipo.



Figura 42: Presiómetro tipo Menard. Fuente: Revista Informes de la Construcción.

7.4.2. Células de presión total

Se utilizan para medir la presión que ejerce el terreno y suelen utilizarse en terraplenes experimentales para control de precargas, estructuras de contención y revestimientos de túneles. Consisten en dos placas de acero soldadas perimetralmente y rellenas con un fluido aceitoso desaereado. La presión ejercida por el terreno sobre las placas es

transmitida a través del fluido, por medio de un tubo de acero inoxidable, a un transductor de presión.

Según el tipo de funcionamiento del transductor de presión, las células de presión pueden ser de los siguientes tipos:

- Neumáticas: permiten la medida directa de las deformaciones mediante un comparador. Se utilizan para la medición de presiones menores a 35 kg/cm^2 .
- Hidráulicas: una cámara de aceite transmite la presión existente al transductor. El proceso de lectura de los resultados suele ser laborioso.
- De resistencia eléctrica: la presión ejercida por el terreno sobre la cara es recogida por un transductor eléctrico.
- De cuerda vibrante: se utilizan cuando se pretende automatizar el proceso de captación de datos y obtenerlos a grandes distancias.



Figura 43: Imagen de célula de presión total. Fuente: SensoGeo S.L.

7.4.3. Células de carga

Las células de carga se utilizan para medir las tensiones transmitidas al terreno debidas a los anclajes, elementos de contención o sostenimientos, así como la propia tensión a la que estos mismos están sometidos.

El sistema de funcionamiento se basa en el principio de contrapresión hidráulica, se trata de un dispositivo de equilibrio de fuerza que mide la fuerza como un cambio en la presión del fluido de llenado interno. La célula de carga puede instalarse en el elemento de contención o sostenimiento, y en diversos puntos de medición entre el elemento y el terreno, de modo que la fuerza aplicada sobre la célula es transformada mediante un transductor en una señal eléctrica medible.

En función del tipo de señal transmitida por el sensor, las células de carga pueden clasificarse como:

- Mecánicas: permiten la medida directa de las deformaciones mediante un comparador. Sólo se utilizan cuando el punto de medida es de fácil acceso.
- Hidráulicas: las deformaciones se miden con células que contienen una cámara de aceite y que transmiten la carga a un transductor.
- Eléctricas: consisten en células cilíndricas metálicas cuya deformación se transmite a sensores eléctricos.
- De cuerda vibrante: se utilizan cuando se desea automatizar la toma de datos.



Figura 44: Célula de carga de cuerda vibrante instalada entre anclaje activo y muro de tierras para monitorizar la presión ejercida por el anclaje en el terreno. Fuente: Propia.

7.4.4. Células de inclusión rígidas (CIR)

Estas células se utilizan para medir la presión en el interior de los sondeos mediante el uso de galgas extensométricas. Se anclan solidariamente al terreno a través de placas de ajuste de modo que las variaciones de las presiones se transmiten al equipo y quedan registradas.

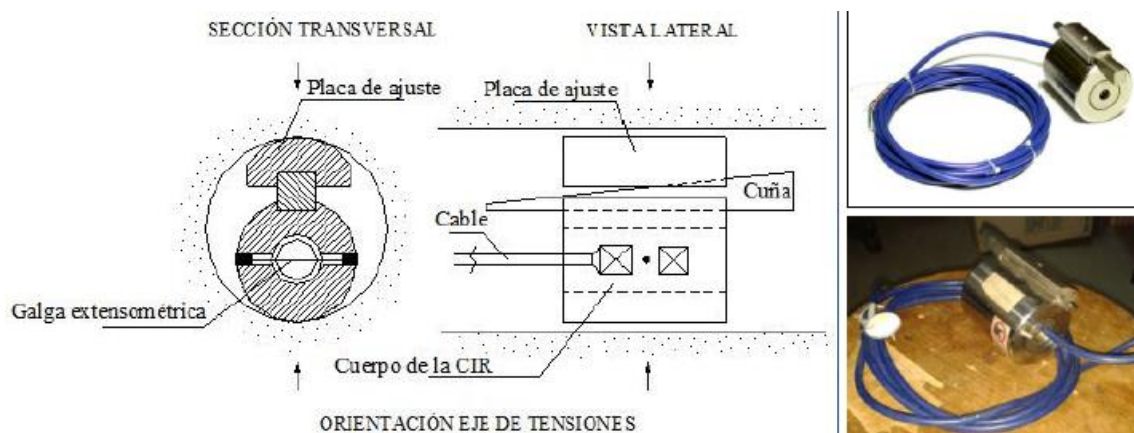


Figura 45: Esquema e imágenes de la célula de inclusión rígida. Fuente: Oliva González, A. O., 2015.

8. MÉTODOS DE MONITORIZACIÓN MEDIANTE SENSORES

Generalmente, los trabajos de instrumentación de taludes requieren un estudio laborioso, realizado in situ, por parte de los ingenieros encargados de la auscultación. En muchos casos, los puntos en los que se deben tomar las medidas se encuentran en lugares difícilmente accesibles, lo que dificulta la labor y en ocasiones añade un factor de riesgo.

Los avances tecnológicos en el ámbito de la instrumentación geotécnica han permitido la automatización de estas labores. Las técnicas y procedimientos de auscultación que permiten la automatización del proceso de monitoreo pueden clasificarse en:

- **Semiautomáticos:** pueden utilizarse cuando no se precisa realizar una captación de datos de forma constante o cuando los puntos de auscultación de no se encuentran en lugares de difícil acceso. De esta forma, el sistema depende de las lecturas que se realizan in situ de forma manual, pero con un grado de automatización que facilita en gran medida la toma de datos en un corto periodo de tiempo. De esta forma pueden realizarse las mediciones con una frecuencia relativamente alta, dependiendo del riesgo de inestabilidad del caso de estudio.
- **Totalmente automáticos:** permiten realizar una monitorización remota en tiempo real de los cambios que se producen en el terreno y en las estructuras cercanas, lo que permite ahorrar tiempo y costes de operación. Estos sistemas resultan recomendables en los casos en los que exista un riesgo elevado de que ocurran daños o pérdidas debido a inestabilidades de taludes o laderas, o cuando los puntos de medición se encuentran en lugares de difícil acceso, por lo que suponen un método idóneo para la auscultación de las infraestructuras ferroviarias.

De los sistemas de auscultación descritos en el capítulo anterior, aquellos que generan una señal eléctrica tienen la posibilidad de ser monitorizados de forma totalmente automática.

Los avances tecnológicos en el ámbito de las telecomunicaciones aplicado a la geotecnia han permitido desarrollar un sistema de monitorización inalámbrica que permite prescindir del control manual y del uso de cables, lo que representa una mejora de la eficiencia.

Por ejemplo, en Dinamarca, la digitalización de los datos en continuo, junto a la aplicación de sistemas de inteligencia artificial en la infraestructura ferroviaria, ha permitido una disminución del 16% de los costes de mantenimiento. Este sistema de trabajo permite crear sistemas de alarma que se activan en el caso de que se excedan ciertos valores definidos como valores umbral o límite.

Este tipo de sistemas permiten el acceso en tiempo real a diferentes factores a controlar en el terreno o las estructuras, lo que permite que los operadores puedan anticiparse a las necesidades, administrar de forma más eficiente la fuerza laboral, disminuir los riesgos y prevenir accidentes.

Los sistemas más frecuentes de monitorización automática son los constituidos por redes de sensores, que toman las diferentes mediciones de interés en puntos concretos, y que están conectados a sus respectivos nodos, que registran la información y la envían a una base de datos central.

Los nodos inalámbricos comerciales, son compatibles con la mayoría de los sensores eléctricos utilizados en geotécnia. Estos nodos, transmiten los datos recogidos a través de ondas de radio de largo alcance a puertas de enlace capaces de recibir, almacenar y enviar los datos a través de internet. Al mismo tiempo, todos estos datos están disponibles a través de una interfaz que permite a los usuarios monitorizar el lugar o infraestructura de estudio de forma remota.

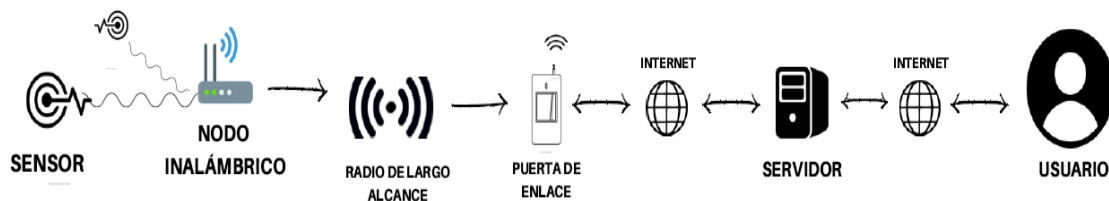


Figura 46: Esquema de transmisión de datos mediante los sistemas de monitorización inalámbricos.
Fuente: Propia.

Durante el proceso de instalación de las unidades inalámbricas, una aplicación Android permite a los usuarios preparar y visualizar la actividad de cada dispositivo. De esta forma es posible establecer ratios de muestreo, comprobar la cobertura de radio en cualquier lugar donde estén los sensores instalados, y controlar en tiempo real los datos tomados por los sensores. Gracias a la aplicación Android, la configuración de los nodos y la monitorización de los procesos puede realizarse fácilmente desde un dispositivo móvil, como un teléfono o una Tablet, las 24 horas del día, lo que evita la necesidad de trasladar ordenadores. Mediante la implementación de sistemas de inteligencia artificial, el sistema es capaz de generar sistemas de alarma en función de los datos recogidos por la red de sensores, que envía un aviso en tiempo real a los dispositivos enlazados. Este sistema proporciona la capacidad de reacción en caso de que se produzca algún suceso inesperado.

Cada unidad es un nodo inteligente dentro de la red inalámbrica de sensores. Todos los nodos actúan como un registrador de datos ("datalogger") para su propio sensor. Las unidades inalámbricas son piezas digitalizadoras de alta precisión que ofrecen mediciones de señal completas de alta resolución y pueden leer a velocidades de muestreo de 30 segundos a 24 horas, dependiendo de los requisitos del proyecto a realizar.

Las redes de sensores pueden expandirse o reducirse fácilmente añadiendo o eliminando nuevas unidades inalámbricas a la red. Los protocolos de red se diseñan de forma que sean muy escalables, una única puerta de enlace puede administrar hasta 500 nodos. La latencia de la red y los índices de pérdida de paquetes son mínimos, debido a la implementación robusta de los protocolos de comunicaciones. El sistema generalmente incluye avanzados sistemas de encriptación para garantizar la seguridad de los datos y su funcionamiento.

La red de dispositivos puede alcanzar rangos de comunicación de varios kilómetros entre nodos, ya que presenta capacidades de potencia ultra baja en las bandas ISM. Uno de los sistemas más altos del mercado alcanza distancias de 15 km, por lo que son una buena solución para lugares de difícil acceso.

Las unidades inalámbricas se diseñan para funcionar de forma autónoma y sin necesidad de revisiones durante largos periodos de tiempo, ya que los componentes de bajo consumo del sistema permanecen en modo inactivo siempre que no se encuentren en funcionamiento. Las unidades se activan cuando necesitan leer datos de algún sensor y lo envían a la puerta de enlace. Seguidamente vuelven a desactivarse automáticamente. Este sistema de ahorro de energía, junto con los avances existentes en el ámbito de las baterías hace posible que estos dispositivos inalámbricos puedan alcanzar una vida útil de hasta 10 años.

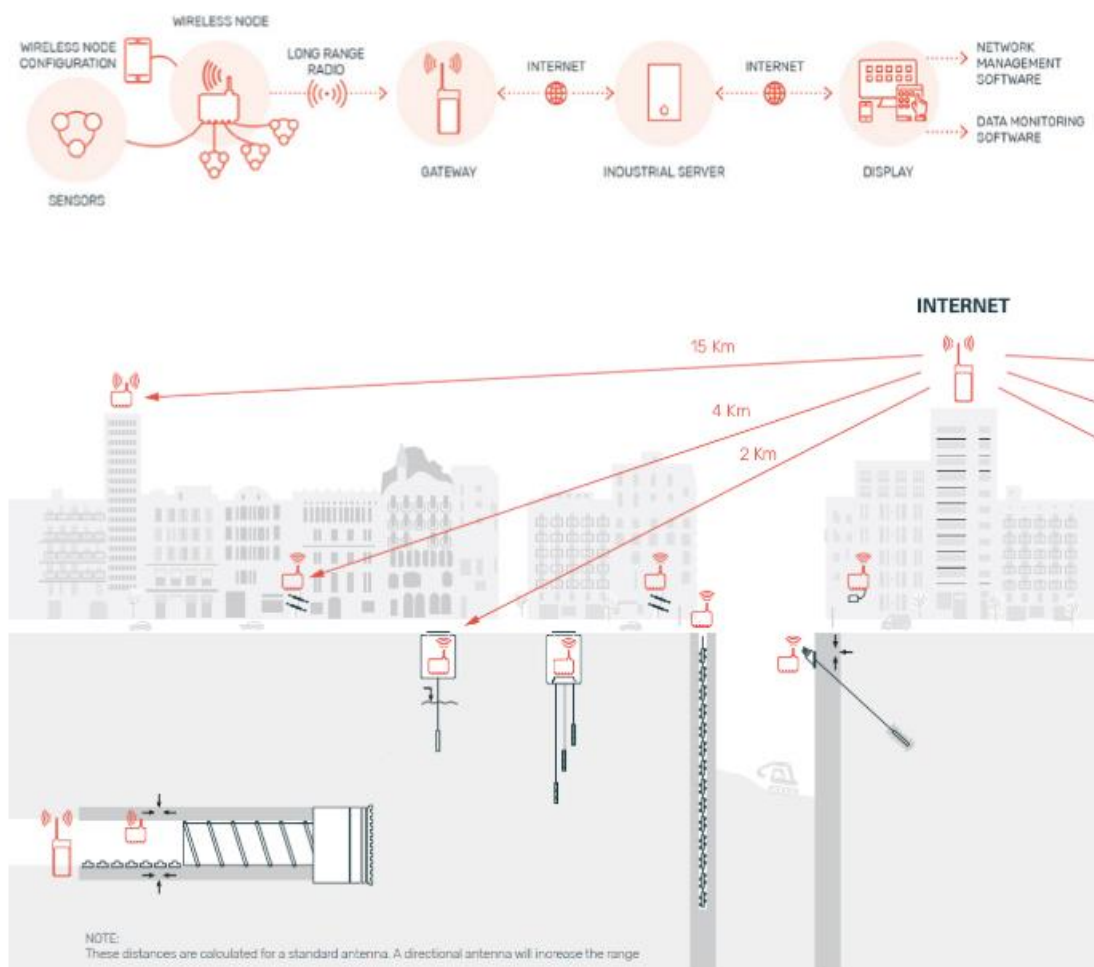


Figura 47: Esquema de funcionamiento del sistema inalámbrico de auscultación mediante sensores.
Fuente: World Sensind.

De la misma forma que en los sistemas de auscultación de taludes tradicional, para definir un Programa de Monitoreo es necesario realizar un reconocimiento previo del talud a controlar con el fin de definir criterios específicos tales como:

- Tipo de medición que requieren las posibles inestabilidades.
- Definir el instrumento que mejor se adapte al talud.

- Definir la ubicación, número y profundidad de instalación de la instrumentación.
- Frecuencia de lectura de las mediciones.
- Tipo de análisis de los datos obtenidos.
- Establecimiento de los valores límites que generen la activación de alarmas.

Dependiendo del tipo de movimiento que se desee controlar, se escogerá la instrumentación idónea para ello según las características del talud. De esta forma, los sistemas de instrumentación automática pueden agruparse en tres grupos:

- Control del terreno en profundidad.
- Control del terreno en superficie.
- Control de estructuras, edificios y servicios vulnerables ante el fenómeno de inestabilidad.

Las características más relevantes de los sistemas de monitorización automática frente a los métodos manuales son:

- Suelen tener un elevado coste de instalación ya que normalmente es necesario la instalación de instrumentación costosa.
- No requiere de intervención humana para la toma de los datos, ya que se trata de un proceso automatizado.
- Los errores humanos se eliminan.
- Normalmente son más precisos que los métodos manuales.

En la *Figura 48* y *Figura 49* puede observarse un ejemplo de monitorización mediante sensores instalados en la Autovía C-25 (Cataluña). En este caso, quería monitorizarse un muro de tierra armada reforzado mediante anclajes activos destinado a la estabilización del terraplén construido para la ampliación del Eje Transversal de la C-25.

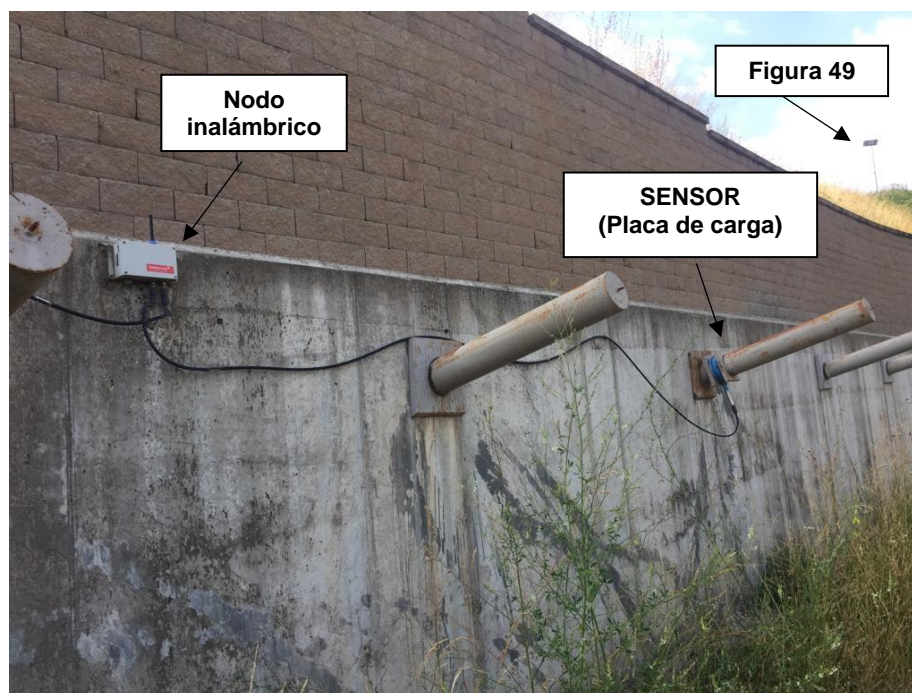


Figura 48: Placas de carga de medición automática conectadas a un sistema de transmisión de datos instalados sobre anclajes activos en un terraplén del Eje Transversal de la C-25 en Cataluña.
 Fuente: Propia.



Figura 49: Sistema de alimentación por placas de captación de energía solar del equipo de sensores y puerta de enlace de transmisión de datos instalado en el Eje Transversal de la C-25 en Cataluña.
 Fuente: Propia.

9. MEDIOS FÍSICOS DE TRANSMISIÓN DE DATOS

Para realizar una auscultación o control de forma remota es necesario que exista un sistema de transmisión de los datos recogidos.

Para poder enviar y recibir información de forma remota es necesario un medio físico a través del cual estos datos puedan ser transmitidos y un sistema capaz de realizar dicha transmisión.

El medio de transmisión es el soporte físico a través del cual un emisor y un receptor pueden comunicarse dentro de un sistema de transmisión de datos. De forma amplia se pueden distinguir dos tipos de medios, los guiados y los no guiados. En ambos tipos la transmisión se realiza a través de ondas electromagnéticas.

Los medios guiados utilizan un medio físico como guía para transmitir la información como el cable coaxial, la fibra óptica y el par trenzado. Los medios no guiados proporcionan un soporte para que las ondas se transmitan, pero no las dirigen, como por ejemplo el aire o el vacío.

Los factores que determinan las características y la calidad de la transmisión son la naturaleza del medio y la señal que se transmite a través de él.

9.1. Medios de transmisión guiados

Como se ha explicado, los medios guiados transmiten los datos a través de un medio físico consistente en un cableado. La información viaja a través de cables de diferentes tipologías que definen la distancia, velocidad de envío, coste de instalación y mantenimiento.

El factor que determina las limitaciones de la transmisión es el propio medio y las limitaciones consisten en la velocidad de transmisión de los datos, el ancho de banda y el espaciado entre los repetidores. El mayor inconveniente de estos sistemas es que los cables pueden dañarse y dejar de funcionar según el entorno en el que se encuentran.

Algunos medios guiados de transmisión de datos son:

- **Pares trenzados**

Consiste en dos alambres de cobre aislados, generalmente de 1 mm de espesor que se entrelazan de forma helicoidal para reducir la interferencia eléctrica con respecto a los pares cercanos que se encuentran a su alrededor. Este medio puede utilizarse tanto para transmisión analógica como digital, y su ancho de banda depende del calibre del alambre y de la distancia que recorre.

Generalmente pueden obtenerse transmisiones de varios megabits, en distancias de pocos kilómetros; su buen comportamiento, junto a su bajo coste, hacen que los pares trenzados sean un medio ampliamente utilizado.

- Cable coaxial

El cable coaxial está formado por un cable de cobre de alta dureza situado en su parte central, que constituye su núcleo. Este núcleo de cobre se encuentra cubierto por un material aislante que, a su vez, está rodeado por un conductor cilíndrico que suele consistir en un tejido centrado y se encuentra protegido por un material plástico.

Este sistema consigue un gran ancho de banda y una excelente inmunidad al ruido. El ancho de banda depende de la longitud del cable, cuanto menor es su longitud mayor será la velocidad de transmisión de datos, por ejemplo, para cables de 1 km de longitud, es posible conseguir velocidades de transmisión de datos de hasta 10 Mbps.

Los cables coaxiales son ampliamente utilizados en redes de área local y en transmisiones de larga distancia de sistemas telefónicos.

- Fibra óptica

Los cables de fibra óptica están formados por tres secciones concéntricas. La sección más interna, el núcleo, consiste en una o más hebras o fibras de cristal o plástico cubiertas con un revestimiento con propiedades ópticas diferentes a las del núcleo; y la capa más externa, que recubre una o más fibras está formada por un material opaco y resistente.

El sistema de transmisión consiste en una fuente luminosa muy monocromática producida mediante diodos o láser, que viaja a través de la fibra que constituye el núcleo, gracias al fenómeno de reflexión que se produce en la cubierta, y fotodiodo en el extremo receptor que reconstruye la señal eléctrica.

Cada fibra de vidrio que forma el cable consta de:

- Un núcleo central de fibra con alto índice de refracción.
- Una cubierta que rodea al núcleo de material similar, pero con un índice de refracción ligeramente menor.
- Material aislante que cubre cada fibra y evita las interferencias entre fibras cercanas al mismo tiempo que proporciona protección al núcleo.
- Revestimiento reforzado sobre el conjunto total como medio de protección física.

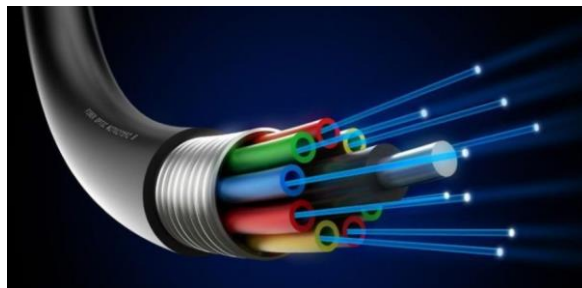


Figura 50: Estructura del cable de fibra óptica. Fuente: Raffino, M. E., 2019.

Hoy en día la fibra óptica es uno de los medios guiados más utilizados para la transmisión debido a sus excelentes características entre las que se encuentran,

gran ancho de banda, baja atenuación de la señal, inmunidad a interferencias electromagnéticas, alta seguridad y larga duración. Sin embargo, su mayor desventaja es su alto coste en relación a otros tipos de cableado. El coste de la fibra óptica es debido a que es preciso utilizar vidrios de alta calidad; y muy frágiles en su manejo en producción; además, la terminación de los cables requiere un tratamiento especial que supone un aumento en los costes de instalación.

9.2. Medios de transmisión no guiados

Los medios no guiados se basan en un medio físico a través del cual pueden transmitirse las ondas desde el emisor al receptor. Tanto la transmisión como la recepción de la información se lleva a cabo mediante antenas que irradian y recogen ondas electromagnéticas que se propagan a través de un medio como puede ser el aire o el vacío. El factor más determinante en la transmisión de los datos es el espectro de frecuencia de la señal producida por la antena.

La configuración para estas transmisiones puede ser direccional y omnidireccional. En el caso de transmisión direccional la energía emitida se concentra en un haz, lo que requiere que la antena transmisora y receptora estén alineadas, cuanto mayor sea la frecuencia de transmisión, más viable resulta confinar la energía en una dirección. En cambio, las antenas de transmisión omnidireccional emiten en todas las direcciones espaciales y la antena receptora es igualmente capaz de recibir la información desde cualquier dirección.

Algunos de los medios no guiados son:

- **Infrarrojos**

El sistema de rayos infrarrojos es método el de transmisión de datos menos utilizado en la actualidad. La información viaja a través de rayos infrarrojos. Las distancias son muy limitadas y es necesario que no existan obstáculos entre el emisor y el receptor.

- **Microondas o radioenlaces**

La transmisión por microondas, también denominado radioenlace, consiste en un sistema de comunicación entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre capaz de enviar información a través de ondas de radiofrecuencia del orden de 300 MHz a 300 GHz. Debido a estas altas frecuencias sus longitudes de onda son relativamente pequeñas, desde 1 a 60 cm, un poco mayores que la energía infrarroja. El soporte físico de transmisión de las ondas es el espacio aéreo y la información se transmite en forma digital a través de ondas de radio de corta longitud. La transmisión es unidireccional, sin embargo, pueden direccionarse múltiples canales a múltiples estaciones dentro de un enlace dado o pueden establecerse enlaces punto a punto. Las estaciones consisten en una antena tipo plato y circuitos para interconectar la antena con la terminal del usuario.

Los radioenlaces utilizan un concepto de comunicación tipo dúplex, lo que significa que deben transmitirse dos portadoras moduladas, una para la transmisión de los

datos y otra para su recepción. Al par de frecuencias asignadas para la transmisión y recepción de las señales se denomina radio canal.

Para un correcto sistema de transmisión, los enlaces deben realizarse entre puntos visibles que posean una altura libre adecuada. De esta forma, los enlaces se posicionan en puntos altos de topografía y para el cálculo de las alturas libres deben tenerse en cuenta la topografía del terreno, la altura y ubicación de los obstáculos en el trayecto, y las variaciones climáticas de la región.

Existen dos tipos de transmisión a través de microondas, las terrestres y las satelitales.

Las **microondas terrestres** están definidas como un tipo de onda electromagnética situada en el intervalo del milímetro al metro, que provee conectividad entre dos lugares (estaciones terrenas) con línea visual directa, utilizando un equipo de radio con frecuencias de portadora superior a 1 GHz. Se trata de una onda unidireccional de corta longitud caracterizada por un ancho de banda que varía generalmente entre 300 a 3000 MHz.

La forma de la onda emitida puede ser analógica (convencionalmente FM) o digital y el sistema es utilizado como medio de enlace entre una empresa y un centro que funcione como centro de conmutación del operador o como un enlace entre Redes de Área Local (LAN).

Para la transmisión de la información es necesario tener antenas parabólicas alineadas o que tengan visión directa entre ellas (line of sight, LOS), por lo que a mayor altura, el alcance aumenta. Entre sus mayores desventajas se encuentran la pérdida de datos por atenuación e interferencias y la alta sensibilidad a las condiciones atmosféricas como la lluvia.

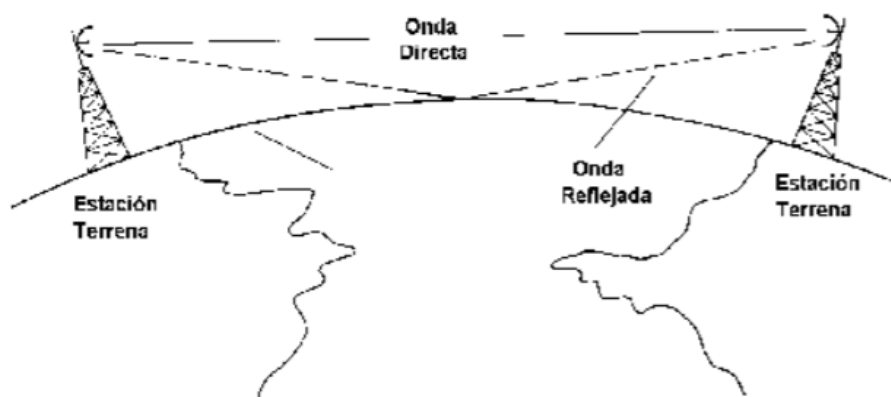


Figura 51: Enlace de microondas de línea vista.

Fuente: <http://www.eveliux.com/mx/curso/microondas-terrestre>.

Las principales aplicaciones de los sistemas de microondas terrestres son:

- Telefonía básica (canales telefónicos).
- Datos.
- Telégrafo/Telex/Facsimile.

- Canales de televisión.
- Vídeo.
- Telefonía Celular (troncales).

Las **microondas por satélite** se basan en la transmisión de información a través de satélites en órbita y manejan un ancho de banda entre los 3 y los 30 GHz.

Los satélites funcionan como una estación de relevo o repetidor. Un transpondedor recibe la señal de un emisor, la amplifica y la retransmite hacia la Tierra con una frecuencia diferente. Debe tenerse en cuenta que, una estación terrena transmisora envía información a un solo satélite, sin embargo, este puede enviar la señal a cualquier estación terrena receptora que se encuentre en su área de cobertura o huella.

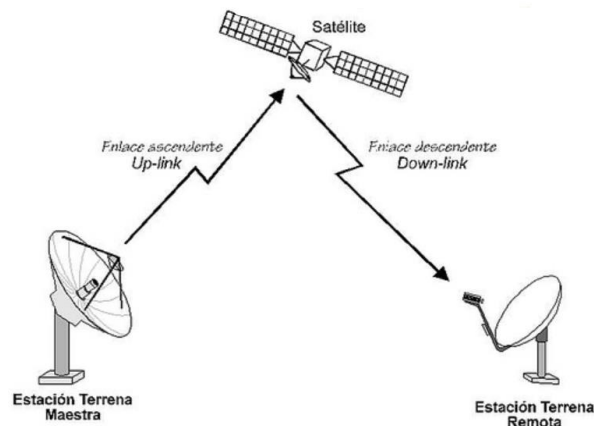


Figura 52: Estación de relevo de microondas vía satélite. Fuente: Gómez, M. E., 2013.

Son capaces de transmitir cualquier tipo de datos y son generalmente utilizadas para sistemas de televisión, transmisión telefónica a larga distancia punto a punto y redes privadas punto a punto. El satélite no procesa la información, si no que actúa como un repetidor/amplificador de la señal recibida capaz de cubrir un amplio espacio de espectro terrestre.

La transmisión vía satélite presenta varias ventajas para cualquier empresa que quiera utilizarla como método de transmisión, ya que representa un precio más bajo que la transmisión vía telefonía móvil debido a que los precios de renta del espacio satelital son más bajos, la transmisión de datos no es sensitiva a la distancia y existe un gran ancho de banda disponible.

Al tratarse de ondas unidireccionales la mayor limitación de las microondas son los obstáculos entre emisor y receptor. Sin embargo, la distancia cubierta por enlaces microondas puede ser aumentada mediante el uso de repetidores que amplifiquen y redireccionen la señal, y los obstáculos pueden ser salvados mediante reflectores pasivos.

Los **repetidores activos** reciben la señal en la frecuencia emitida, la disminuyen a una frecuencia intermedia (FI), para amplificarla y retransmitirla en la frecuencia de salida.

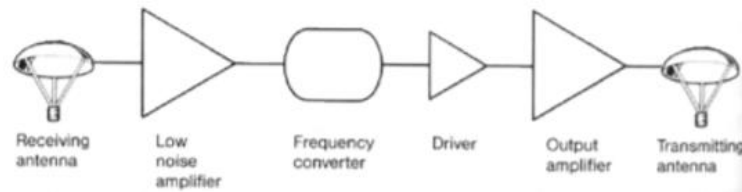


Figura 53: Funcionamiento de un repetidor de radioenlace. Fuente: Red Tauros Ltda.

Por otro lado, los **reflectores pasivos** son una solución técnica para realizar redes de microondas en áreas con visibilidad radioeléctrica anulada o reducida debido a obstáculos entre los tramos de radio (montañas, edificios, árboles, etc.). Se denominan pasivos porque no requieren ninguna fuente de energía eléctrica, ya que se comportan como espejos que reflejan la señal que reciben. Entre los reflectores, pueden distinguirse dos grupos; los reflectores pasivos convencionales, que consisten en una pantalla reflectora y los reflectores pasivos back-back, que están constituidos por dos antenas espalda a espalda.

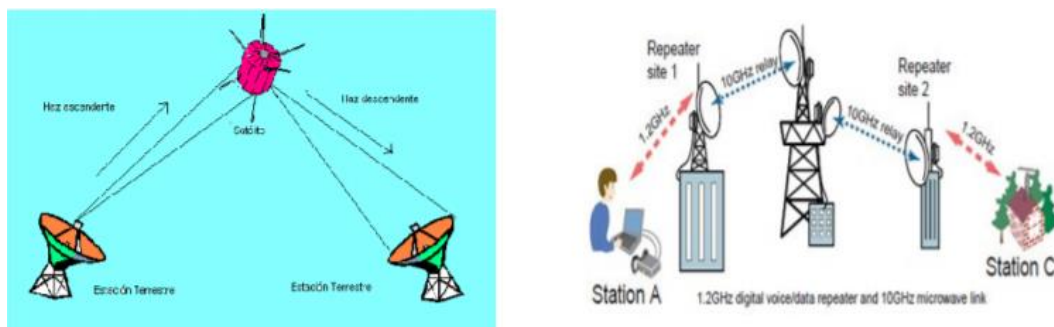


Figura 54: Esquema de funcionamiento de los reflectores pasivos convencionales (izquierda) y los pasivos back-back (derecha). RedTauros Ltda.



Figura 55: Imagen de un reflector pasivo tradicional. RedTauros Ltda.

10. SISTEMAS DE DETECCIÓN REMOTA

La teledetección o detección remota consiste en la adquisición de información de un objeto o fenómeno desde sensores instalados en plataformas espaciales, aerotransportadas o terrestres, sin que se produzca un contacto físico entre el sensor y los puntos u objetos de estudio.

Estas técnicas han experimentado un notable desarrollo en las últimas décadas y están implementándose cada vez más en el campo de la mecánica de rocas y el estudio de estabilidad de taludes y laderas. Las principales ventajas del uso de técnicas de detección remota son:

- Posibilidad de toma segura de datos en casos en los que el acceso al macizo rocoso es limitado, peligroso o imposible (taludes muy verticales, en líneas de costa, etc.) o cuando existen limitaciones de tiempo para la adquisición de información (por ejemplo, en los frentes de túneles).
- Permiten la realización de tomas de datos masivas (miles o millones de puntos) sobre extensas superficies de forma rápida, eficaz y, generalmente a costes muy competitivos en relación a las técnicas convencionales [38].

Entre las técnicas remotas más utilizadas se encuentran la Interferometría Radar de Apertura Sintética (INSAR), el láser scanner (LiDAR) y la fotogrametría.

10.1. Teledetección Radar

La Teledetección RADAR (“Radio Detecting and Ranging”) es una técnica que lleva utilizándose desde hace relativamente poco, y que sigue evolucionando tecnológicamente. Consiste en sensores embarcados en satélites, aeronaves o plataformas terrestres capaces de obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre basándose en los “ecos” de pulsos de las ondas electromagnéticas emitidas por el mismo sensor. Las frecuencias habituales que se utilizan se encuentran dentro del rango de las microondas (longitudes de onda entre 1 mm y 1 m) y operan generalmente en las bandas L (1-2 GHz), S (2-4 GHz), X (8 -12 GHz), Ku (12-18 GHz) y Ka (26,5-40 GHz). Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será su capacidad de penetración en zonas vegetadas, pero peor será su resolución espacial.



Figura 56: Capacidad de penetración de las ondas Radar. Fuente: National Aeronautic and Space Administration, 2016.

Se trata de un sistema de teledetección activo, ya que no se mide la emisión natural de los puntos iluminados por la luz solar, si no que los sensores móviles, a bordo de satélites, aeronaves o plataformas terrestres iluminan el terreno lateralmente mediante una emisión controlada de pulsos de microondas con ángulos de inclinación entre 23 y 46°, y miden el rebote en diferentes puntos del terreno. De esta forma, este sistema puede ser utilizado tanto de día como de noche y con cierta independencia de las condiciones meteorológicas y de visibilidad, ya que la señal de radio puede atravesar las nubes que puedan estar cubriendo la zona de estudio.

El resultado que se obtiene inicialmente es una nube de intensidades de reflexión de los pulsos a lo largo del tiempo que, punto a punto, es traducida en datos de amplitud, que corresponden al módulo de la reflectividad o dispersión del terreno y datos de fase, que están relacionados con la distancia entre el sensor y los puntos del terreno que reflejan la señal.

Estos pares de datos de amplitud y fase pueden ser expresados como un número complejo que, asociado a cada píxel de la imagen Radar permiten, mediante su correcto procesado, construir modelos de imágenes en 3D.

Los **Radares de Apertura Sintética (SAR)**, combinan la información registrada por una sola antena receptora de los diferentes puntos a lo largo de la trayectoria de la plataforma que lo transporta. De esta forma, es posible obtener la misma información que hubiera captado una antena de dimensiones mucho mayores y poco práctica o imposible de operar (aperturas sintéticas desde 100 m hasta km).

La fase (ϕ) de una imagen SAR viene dada por la expresión:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} R$$

Donde:

- λ : Longitud de onda electromagnética
- R : Distancia existente entre el sensor y la superficie del terreno

Las principales ventajas de los sistemas de teledetección SAR desde satélites son que cubren áreas extensas (1000 a 10000 m²), que tienen buena cobertura temporal (hasta cada 3 días en algunos casos), la resolución espacial es de varios puntos por Ha (píxel entre 20 y 50 m) y finalmente, su coste es competitivo.

10.1.1. Interferometría SAR convencional (InSAR)

El tratamiento del conjunto de imágenes SAR obtenidas se realiza mediante la **Interferometría SAR (InSAR)**. La técnica InSAR compara la fase de dos o más imágenes SAR adquiridas sobre la misma escena, en fechas distintas para generar mapas de deformación de la superficie del terreno, consiguiendo medir deformaciones de orden milimétrico a lo largo de periodos que van de días a años.

Para estimar la magnitud de las deformaciones a partir de la diferencia de fase entre ambas imágenes se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta\psi_{int} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)$$

La diferencia de fase entre ambas imágenes ($\Delta\psi_{int}$) se denomina fase interferométrica y se representa a través de los interferogramas diferenciales. Esta fase está formada por una parte relativa a las deformaciones del terreno ($\Delta\psi_{deformación}$) y otra a los errores producidos en la medición ($\Delta\psi_{errores}$), relacionados con la órbita de los satélites, la topografía del terreno o las diferencias atmosféricas existentes entre los momentos de toma de las imágenes SAR [39].

$$\Delta\psi_{int} = \Delta\psi_{deformación} + \Delta\psi_{errores}$$

En el caso de sensores a bordo de satélites, este sistema consiste en superponer imágenes correspondientes a dos posiciones diferentes del satélite en la misma órbita, o a dos pasadas de toma de datos diferentes pero próximas, o la toma de datos de dos satélites diferentes trabajando conjuntamente. En el caso de sensores aerotransportados o en puntos fijos, se utilizan dos antenas receptoras separadas unos 50-70 cm para la toma de datos desde diferentes perspectivas.

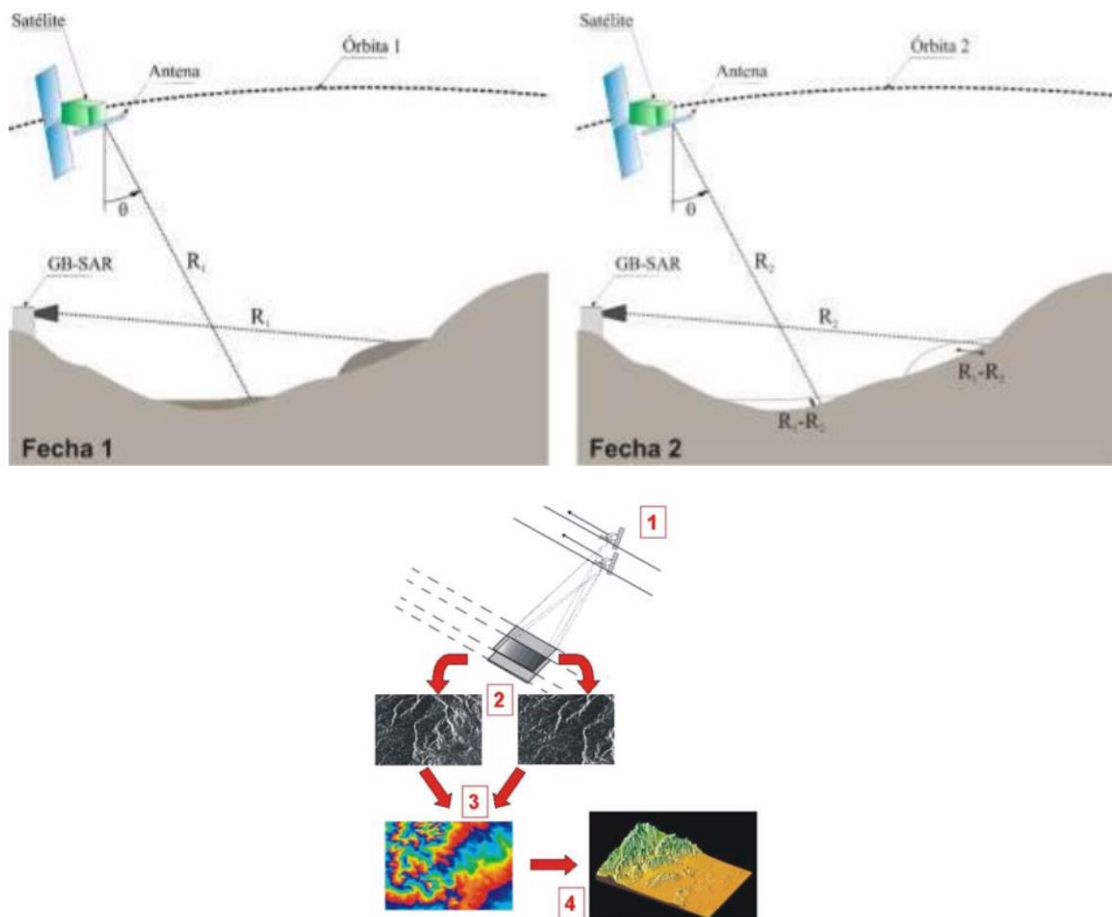


Figura 57: Principio de Interferometría SAR (InSAR). Fuente: Gili et al., 2002.

Multiplicando una de las imágenes por el complejo conjugado de la segunda, es posible obtener el interferograma de la zona de estudio y su fase corresponde a la diferencia de

fases de las dos imágenes originales. Las franjas del interferograma obtenido corresponden a puntos a la misma diferencia de distancia inclinada a las posiciones del sensor, cada franja equivale a una diferencia de recorrido de $\lambda/2$ en la dirección de emisión del RADAR.

A continuación, es necesario realizar un postproceso de los datos que consiste:

- Corrección de Tierra Plana. La componente, fase generada por una superficie matemática de referencia (elipsoide WGS84) se resta de la fase del interferograma complejo.
- Mejora del interferograma mediante el filtrado de la fase.
- Eliminación de la ambigüedad del ciclo mediante la acumulación de ciclos completos ($\lambda/2$) con el objetivo de obtener diferencias totales correspondientes con las diferencias reales de distancia.
- Conversión de las fases en diferencias de alturas verticales que deben, posteriormente, georeferenciarse obteniéndose así el Modelo Digital de Elevaciones (MDT o topografía) del terreno.

Mediante esta técnica es posible obtener modelos digitales del terreno de precisión, llegando incluso a zonas de difícil acceso mediante los sensores aerotransportados.

Hay que tener en cuenta que la técnica InSAR clásica no puede ser aplicada a cualquier situación, debido a que existen limitaciones que pueden interferir notablemente en los resultados.

Se define la coherencia (γ) como el parámetro relacionado con la calidad obtenida en la estimación de la fase interferométrica. Este parámetro varía entre 0 (baja calidad) y 1 (alta calidad) y uno de los factores que más influye en su magnitud es el cambio que se produce en el terreno en el intervalo de tiempo existente entre la toma de las imágenes RADAR.

En los terrenos donde exista mucha vegetación, la coherencia será baja, ya que la señal tiene menor penetrabilidad a través de la vegetación, y se producirá un cambio en el rebote de la señal a lo largo de las diferentes estaciones del año. Por otro lado, la señal en zonas urbanas o en áreas rocosas, por ejemplo, la coherencia será alta, ya que la geometría del lugar permanecerá constante a lo largo de las estaciones y la señal RADAR rebotará de forma similar. Otro factor que influye en la calidad de la fase interferométrica es el estado atmosférico, ya que puede variar durante las diferentes secuencias de toma de datos enmascarando u ocultando la parte de la fase interferométrica debida a los movimientos del terreno.

10.1.2. Interferometría Diferencial Avanzada (A-DInSAR)

El sistema de **Interferometría SAR Diferencial Avanzada (A-DInSAR)** empezó a desarrollarse a principios de siglo XX como una variación de la técnica InSAR para su aplicación a la monitorización de pequeñas deformaciones en áreas extensas. Esta técnica se basa en el uso de un gran número de imágenes SAR (por lo menos 20 o 25) lo que permite mejorar la estimación de la deformación y minimizar los errores relacionados con la variabilidad atmosférica. Para ello, se procesan datos de diferentes

instantes de tiempo o épocas y se compara con el MDT obtenido previa o independientemente correspondiente al instante inicial. De esta forma es posible obtener las variaciones producidas en la topografía con una precisión centimétrica. Para aplicar esta técnica es necesario poseer:

- Colección de imágenes SAR de la zona de estudio adquiridos en un periodo de interés.
- Conocimiento de las órbitas precisas del satélite en el momento exacto de la adquisición de cada imagen.
- Modelo Numérico del Terreno (MNT) del área de estudio.

El paso inicial consiste en seleccionar los píxeles en los que va a estimarse la deformación, que puede realizarse mediante el análisis de la coherencia o de la amplitud. Si se analiza la coherencia, debe calcularse la coherencia de cada píxel en cada uno de los interferogramas, y establecer un valor umbral de coherencia por encima del cual, se seleccionan los píxeles para estimar la deformación [40]. En cambio, si se analiza la amplitud, se seleccionan los píxeles del conjunto de imágenes SAR en los que la señal radar rebota de forma estable a lo largo del periodo de observación [41, 42].

Una vez escogidos los píxeles por uno de los dos métodos, debe realizarse una estimación de la deformación en dos etapas. En la primera etapa se estima un término lineal que corresponde a la velocidad de deformación. En la segunda etapa se estima un término no lineal, que sumado al término anterior resulta en una estimación de la deformación en tiempo real para cada píxel. Al mismo tiempo que se realiza este cálculo, se minimizan los errores debidos a variabilidad atmosférica y otras fuentes de error.

Finalmente, se obtienen los resultados correspondientes a la velocidad media de la deformación, su evolución temporal para cada píxel seleccionado y otros parámetros que permiten evaluar la calidad de los resultados obtenidos para cada píxel.

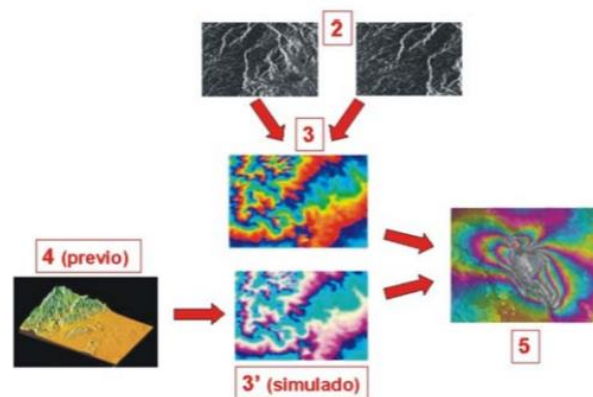


Figura 58: Esquema de funcionamiento del sistema de Interferometría SAR Diferencial Avanzada (A-DInSAR). Fuente: Gili et al., 2002.

10.1.3. Ground-based SAR (GB-SAR)

La técnica SAR Terrestre (“Ground-based SAR”, GB-SAR), permite monitorizar superficies del terreno a distancia de pocos kilómetros, de esta forma es posible

conseguir resoluciones espaciales de orden métrico. En este caso, el sensor RADAR que se desplaza sobre un rail, en lugar de una órbita como se realiza en el caso de radar a bordo de satélites. La distancia de adquisición de datos variará en función de la distancia donde se instale la plataforma del RADAR. A menor distancia se conseguirán mejores resoluciones.

Otra gran ventaja de los sistemas SAR terrestres es que el operador puede decidir la frecuencia de toma de imágenes, permitiendo obtener del orden de una imagen cada 20 minutos. En cambio, los sistemas SAR satelitales están limitados por el tiempo en el que el satélite es capaz de completar un ciclo y volver a pasar por la misma zona, lo que corresponde a una frecuencia mínima de unos 11 días (por ejemplo, el satélite Terrasar-X de la agencia espacial alemana).

Hay que tener en cuenta que el tema de la frecuencia de toma de imágenes es fundamental en estas técnicas, ya que condiciona la velocidad de deformación máxima observable. De esta forma, los sistemas RADAR satélite sólo serán útiles para la observación de movimientos muy lentos, mientras que el sistema RADAR terrestre permite el estudio de movimientos de velocidad moderada.

Una vez obtenidas las imágenes SAR mediante el sistema RADAR terrestre, su procesamiento será muy similar al realizados mediante los sistemas SAR satelitales.

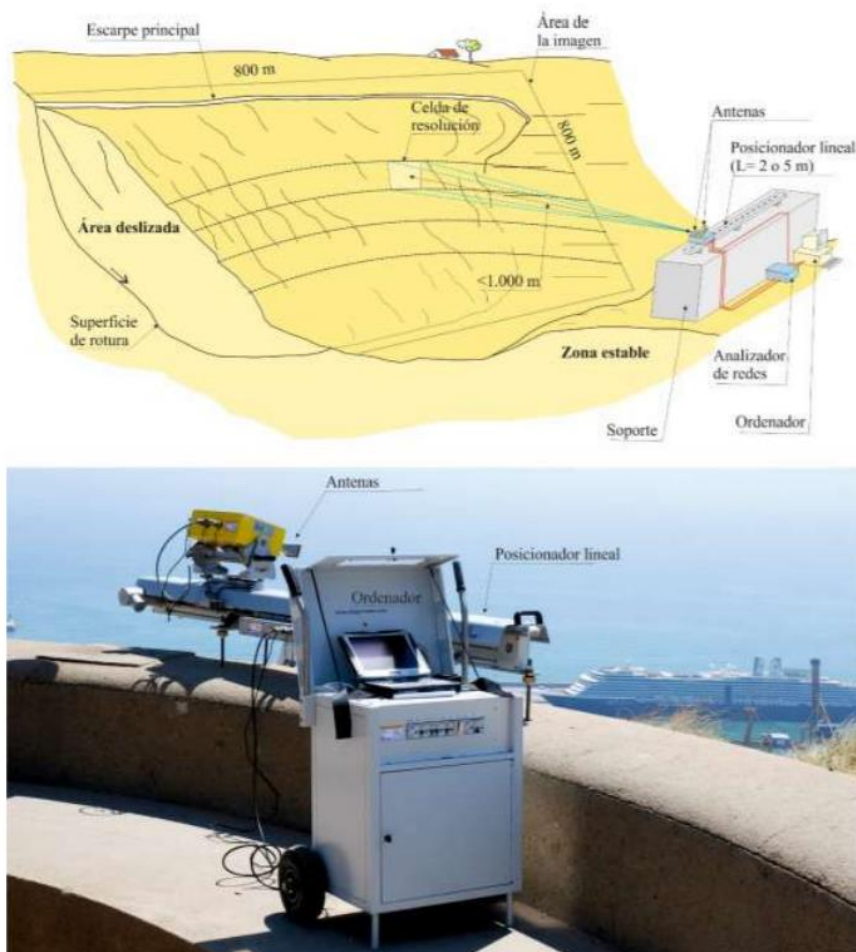


Figura 59: Esquema de funcionamiento de un equipo radar terrestre (arriba) y fotografía de un equipo SAR terrestre propiedad del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)

10.1.4. Aplicaciones

La interferometría **SAR satelital** ha sido exitosamente utilizada para la monitorización de procesos de deformación de la superficie terrestre causados por subsidencias del suelo, movimientos de laderas, terremotos y vulcanismo. Esta técnica permite identificar y cuantificar los desplazamientos en la línea de vista (LOS) del RADAR para cada una de las imágenes procesadas, lo que permite generar mapas de desplazamiento acumulado o de velocidad de desplazamiento. El uso de pistas ascendentes y descendentes permite determinar las tres componentes del desplazamiento.

Otra técnica derivada de InSAR son las series temporales de desplazamiento, que permiten evaluar la evolución de las deformaciones superficiales del terreno a lo largo del tiempo, obteniendo información acerca de cambios de tendencia que permiten relacionar los movimientos con sus factores desencadenantes.

Las principales limitaciones de estas técnicas son [43]:

- Decorrelación temporal debido a variaciones de reflectividad de los puntos de la escena (lluvia, viento sobre la vegetación, crecimiento de la vegetación, arado de campos) que se traduce en una degradación de la coherencia.
- Decorrelación geométrica debido a una línea de base demasiado larga o ruido excesivo si la fase es demasiado corta.
- Limitaciones geométricas: la geometría de las laderas respecto a la línea de vista del satélite puede suponer una limitación para esta técnica ya que en las zonas donde existan pendientes del terreno pronunciadas los desplazamientos pueden llegar a ser indetectables. Este es el caso de los taludes orientados hacia el E o el W con fuerte pendiente.
- Dificultades en la eliminación de la ambigüedad de la fase, especialmente en zonas montañosas debido a la presencia de sombras variables y a otras deformaciones de la imagen SAR.
- Anomalías o artefactos atmosféricos (ionosfera, troposfera) que refractan la señal.
- Limitaciones debido al tamaño y velocidad de los movimientos.

La pérdida de coherencia puede minimizarse mediante el uso de reflectores de esquina que aseguran una fuerte respuesta en las imágenes SAR, permitiendo una excelente estimación de la fase interferométrica y por tanto una precisa estimación de los desplazamientos en esos puntos.

El **GB-SAR** solventa algunas de las limitaciones del InSAR satelital, como la decorrelación atmosférica, la influencia del tamaño de la inestabilidad o la velocidad de deformación, por lo que resulta óptimo para el estudio de movimientos de ladera, ya que permite estudiar incluso aquellos de velocidad moderada. Sin embargo, esta técnica no resulta adecuada para el estudio de subsidencias ya que para ellos requiere la existencia de puntos elevados localizados en zonas estables desde los cuales se tenga visión completa del movimiento a estudiar [44].

La técnica **A-DInSAR** representa un nuevo futuro para el seguimiento de inestabilidades o para la detección temprana de movimientos “nuevos”. En la actualidad ha aplicado con éxito para:

- Cálculo de deformaciones diferenciales en los alrededores de zonas de falla como consecuencia de movimientos sísmicos.
- Medida de subsidencias en zonas urbanas como consecuencia de la presencia de explotaciones mineras profundas.
- Deformaciones de edificios debido a cambios de temperatura.
- Deformaciones pre-eruptivas en volcanes debido a presión magmática.
- Desplazamientos de glaciares y grandes deslizamientos.

Tipo de Movimiento	Velocidad	Velocidad (m/s)	Radar Satélite	Radar Terrestre
Extremadamente lento			Si	Si
Muy lento	16 mm/a	5×10^{-10}	Parcialmente	Si
Lento	1,6 m/a	5×10^{-8}	No	Si
Moderado	13 m/mes	5×10^{-6}	No	Parcialmente
Rápido	1,8 m/h	5×10^{-4}	No	No
Muy rápido	3m/min	5×10^{-2}	No	No
Extremadamente rápido	5 m/s	5	No	No

Tabla 18: Escala de velocidades de movimiento de taludes y laderas respecto a los límites de monitorización de los sistemas radar. Fuente: IGUS/WGL, 1995.

10.2. Láser scanner (LiDAR)

La técnica LiDAR, (Light Detection and Ranging) consta de un sensor remoto que combina el sistema topográfico tradicional junto con el uso de GPS, permitiendo la adquisición de información tridimensional de taludes de forma rápida y precisa. Esta técnica permite la realización de controles superficiales y subterráneos de alta resolución (>1.5 cm) desde grandes distancias de adquisición comprendidas entre 800 y 2500 m.

El método se basa en el cálculo de la distancia real entre un emisor láser y la superficie del terreno a través de la medida del tiempo de vuelo del haz láser o de la diferencia de fase experimentada entre la señal emitida y la reflejada (láser de medición de fase).

El resultado es la obtención de una malla tridimensional o nube de puntos de las superficies de los objetos, cuya posición está perfectamente georreferenciada. Por otro lado, la mayoría de los equipos LiDAR proporcionan también imágenes en color de las zonas escaneadas, así como el valor de la señal reflejada, lo que aporta información adicional acerca de la naturaleza del objeto. De esta forma, el láser scanner permite obtener la siguiente información de cada punto del terreno:

- Valor de las coordenadas XYZ.
- Valor de intensidad (I).
- Color verdadero (RGB).

Los datos registrados deben ser procesados para introducirlos en un sistema de referencia común y posteriormente filtrar los puntos de ruido como pueden ser los que captan la vegetación.

Con el objetivo de crear un modelo completo con un sistema común de referencia y asignar coordenadas a todos los elementos de referencia empleados, y poder así, realizar comparaciones entre las diferentes campañas, en cada campaña de toma de datos es muy importante definir:

- La resolución del escaneado.
- La distancia de escaneado.
- La ubicación de cada escaneado.
- El número y localización de todos los elementos de referencia empleados.

La comparación de los datos 3D procedentes de distintas campañas de adquisición de datos permite la detección de movimientos y desplazamientos en cualquier dirección junto con la cuantificación de su magnitud.

La toma de datos mediante LiDAR puede realizarse desde una plataforma aérea (LiDAR aéreo o "air-borne LiDAR"), desde un vehículo terrestre ("car-borne LiDAR" o "train-borne LiDAR"), desde una embarcación ("boat-based LiDAR") o desde una plataforma fija terrestre (Laser Scanner Terrestre, TLS).

10.2.1. LiDAR terrestre

El sistema láser escáner terrestre permite obtener una nube de millones de puntos del terreno en 3D a gran velocidad (más de 100.000 puntos por segundo) con una gran precisión (<1 cm) y desde grandes distancias (>1 km).

El equipo consta de un elemento emisor/receptor de pulsos infrarrojos (láser) y un instrumental de barrido de puntos (escáner). De esta forma, es posible determinar la distancia (δ) entre el láser escáner y el terreno a partir del tiempo de vuelo (t_f) que emplea el pulso láser para viajar y reflejar en la superficie de interés a la velocidad de la luz (c) cumpliendo la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{c \cdot t_f}{2}$$

El sistema de adquisición de datos cuenta con un dispositivo interno de espejos rotatorios que modifican continuamente los ángulos horizontales (ϕ) y vertical (ϑ), lo que permite escanear la totalidad de la zona de estudio. De esta forma, es posible definir la localización de cada punto de la zona mediante coordenadas esféricas en las cuales la distancia (δ) y los ángulos horizontal (ϕ) y vertical (ϑ) son datos conocidos. A partir de estos datos es posible realizar la conversión a coordenadas cartesianas a través de la siguiente ecuación:

$$(x, y, z) = \delta(\cos \vartheta \cdot \cos \phi, \cos \vartheta \cdot \sin \phi, \sin \vartheta)$$

La adquisición de los datos 3D se realiza de forma masiva, consiguiendo una nube de puntos para lo que se debe, previamente, seleccionar el espaciado deseado entre los puntos, normalmente inferior a 5 cm, para una mayor precisión en el monitoreo [45]. Por otro lado, se recomienda que el estacionamiento del TLS sea el mismo para las

diferentes tomas de datos a realizar [46], y que su distancia a la superficie de estudio sea menor a 1500 m, ya que la precisión disminuye con la distancia del escaneo.



*Figura 60: Imagen de equipo LiDAR terrestre (LST) modelo RIEGL VZ-400 montado sobre trípode.
Fuente: DeltaLiDAR.*

10.2.2. LiDAR sobre plataforma móvil

Los avances tecnológicos han permitido el uso integrado del sistema LiDAR sobre una plataforma móvil que puede consistir en un avión, un vehículo terrestre, una embarcación o un vehículo aéreo no tripulado (UAV).

Para obtener un correcto posicionamiento y orientación de los datos tomados desde una plataforma móvil se utiliza el apoyo de un sistema GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS) que permiten definir con precisión las coordenadas de cada punto escaneado. El procesado de los datos se realiza de la misma manera que en el sistema laser terrestre.

A continuación, se muestran dos equipos destacables en la integración del equipo láser terrestre sobre vehículos terrestres y sobre vehículos aéreos no tripulados (UAV).

- **LiDAR sobre vehículo terrestre**

La integración de la tecnología láser 3D, junto a sistemas digitales de imágenes móviles de mapeo, ofrece una nube de puntos de alta precisión y densidad combinada con imágenes panorámicas de alta resolución combinados en un aparato ligero y fácil de manipular que puede acoplarse y desacoplarse fácilmente en diferentes vehículos. Este sistema cuenta con una unidad de medición inercial (IMU), un receptor GNSS (GPS y GLONASS) y un odómetro de vehículo, lo que permite obtener nubes densas de puntos con una orientación y posicionamiento de alta precisión en un entorno dinámico.



- Figura 61: Componentes del sistema Mobile Mapping IP-S3. Fuente: Topcon Positioning.

- LiDAR sobre UAV

Hasta hace relativamente poco, el uso del sistema LiDAR a bordo de vehículos aéreos no tripulados requería el uso de UAV o RPAS de gran peso debido a las grandes dimensiones de los aparatos LiDAR. Esto había limitado mucho este tipo de plataforma para el uso del sistema láser escáner ya que la legislación existente es extremadamente restrictiva con vehículos UAV o RPAS de más de 25 kg de peso total.

Los avances tecnológicos recientes en sistemas LiDAR, han permitido desarrollar diseños más compactos de forma que puedan instalarse a bordo de dispositivos UAV sin que estos requieran unas dimensiones y pesos desorbitados. Algunos de los diseños más recientes pueden instalarse sobre drones comerciales de tipo standard con capacidad de carga limitada sin perder precisión o campo de visión. Algunos de los sistemas más ligeros han reducido las dimensiones hasta conseguir un peso total de 4,8 kg e integran baterías tipo LiPo Litio, que proporcionan una autonomía de vuelo de hasta 4 horas. El equipo completo con el peso mencionado, integra los siguientes sistemas:

- Scanner, IMU y dos antenas GNSS.
- Montaje opcional antivibraciones.
- Montaje opcional de batería Li-ion de 90 Wh.
- Antena GNSS Monting Boom.



Figura 62: Equipo Robin Mini UAV LiDAR montado sobre UAV multirrotor. Fuente: Meteo-Tech Ltd.

10.2.3. Aplicaciones

Las aplicaciones del sistema LiDAR en el campo de la ingeniería son muy diversas. Algunas de las más destacables son: levantamientos de Modelos Digitales de Elevaciones del terreno, cálculo y cubicación de volúmenes de acopios, excavación y relleno de excavaciones tanto subterráneas como a cielo abierto, detección de cambios en taludes y laderas, o determinación de los parámetros geomecánicos de un macizo rocoso.

Para el estudio de los taludes colindantes a vías ferroviarias, las aplicaciones de interés de esta técnica son la detección de cambios en el terreno y la caracterización geomecánica.

- **Detección de cambios**

Para realizar un seguimiento de un talud o ladera y caracterizar los posibles movimientos que puedan producirse, es necesario realizar por lo menos dos pasadas de escaneos o adquisición de datos separados en el tiempo.

Mediante la primera campaña de escaneo, se obtiene lo que se denomina la nube de puntos de referencia, que se emplea para definir la superficie de referencia (S_0) de las mediciones. Esta superficie es creada a partir de la construcción de una red de triángulos irregulares (Triangulated Irregular Network, TIN) cuyos vértices corresponden a los puntos medidos sobre el terreno conectados entre sí a través de una triangulación de Delaunay, que consiste en una red de triángulos conexa y convexa que cumple la condición de Delaunay. Esta condición impone que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo [47].

Una vez se ha construido esta superficie de referencia, se realiza una segunda campaña de escaneo realizada desde la misma estación, obteniendo un nuevo conjunto de datos denominado nube de puntos de comparación (D_i). Para poder comparar ambas superficies, es necesario realizar una alineación de la nube de puntos de comparación (D_i) con la nube de puntos de referencia (S_0) mediante un ajuste por mínimos cuadrados con el fin de minimizar la distancia existente entre ellas [48]. Para realizar esta alineación y calcular la diferencia entre ambas superficies, es necesario disponer de un sistema común de referencia (r_0), cuyo origen puede fijarse en el interior del equipo LiDAR.

De esta forma, la diferencia puede calcularse como el cambio en la distancia entre ambas series de datos a lo largo de la línea de vuelo según la siguiente ecuación:

$$\Delta r_{xyz} = r_{xyz, \overline{Di}} - r_{xyz, \overline{S0}} \cdot r_0$$

Donde $r_{xyz, Di}$ y $r_{xyz, S0}$ son las distancias del punto de coordenadas (x,y,z) en las superficies de comparación y referencia respectivamente.

- Caracterización geomecánica de macizos rocosos

La información 3D obtenida de los puntos del terreno mediante el sistema laser scanner puede ser utilizada para extraer parámetros geométricos de las discontinuidades existentes en el terreno tales como el número de familias de discontinuidades, su orientación, espaciado, persistencia, rugosidad, apertura, longitud de la traza, así como otros parámetros necesarios para la caracterización de un macizo rocoso como el tamaño de los bloques o la localización y cantidad de agua existente [49]. En la siguiente tabla se resumen las posibles fuentes de información para la obtención de los parámetros geomecánicos de un macizo rocoso:

PARÁMETRO	ADQUISICIÓN	ORIGEN DE DATOS
Orientación [°]	• Análisis geométrico	• Campo • Nube de puntos 3D
RQD [%]	• Testificación • Análisis geométrico	• Laboratorio • Campo • Nube de puntos 3D
Espaciado [m]	• Testificación • Análisis geométrico	• Laboratorio • Campo • Nube de puntos 3D
Persistencia [m]	• Análisis geométrico	• Campo • Nube de puntos 3D
Apertura [m]	• Análisis geométrico	• Campo • Nube de puntos 3D
Rugosidad	• Análisis geométrico	• Campo • Nube de puntos 3D
Agua	• Intensidad	• Campo • Nube de puntos 3D
Tamaño de bloque [m³]	• Análisis geométrico	• Campo • Nube de puntos 3D

Tabla 19: Posibles fuentes de información de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso. Fuente: modificado de Riquelme et al., 2016

Las principales ventajas del análisis de los parámetros geomecánicos mediante técnicas LIDAR frente a la toma de datos manual son:

- Minimización de los posibles errores producidos mediante la toma de datos manual.
- Reducción considerable del tiempo de adquisición de datos.
- Eliminación de situaciones de riesgo en aquellos casos en que las condiciones de adquisición de datos de forma manual pueden ser peligrosas, adversas o incluso imposibles.

El procesado de los datos de las nubes de puntos para obtener la información sobre las discontinuidades existentes puede realizarse de forma manual o semiautomática (métodos supervisados).

El proceso manual consiste en identificar las discontinuidades con ayuda de un programa de gestión de nubes de puntos (por ejemplo: Cloud Compare o el Polyworks) y con apoyo de fotografías o asignando tramas de colores RGB a los puntos que constituyen la nube, visualizando al mismo tiempo la información en 3D. De esta forma es posible seleccionar el conjunto de puntos que pertenezcan a la misma discontinuidad y mediante un ajuste por mínimos cuadrados, y obtener la ecuación del plano que proporciona información acerca la orientación de la discontinuidad. Se trata de un proceso laborioso y que depende mucho de la experiencia de la persona que realice el proceso, pudiendo producirse errores o falta de identificación de discontinuidades poco representadas en las nubes de puntos.

Los métodos semiautomáticos o supervisados utilizan diferentes estrategias para identificar la orientación de cada punto o conjunto de puntos de la nube de datos 3D. Algunos métodos exploran la información de la nube de puntos buscando para cada punto y los de su alrededor aquellos que se ajustan de forma adecuada a la ecuación de un plano [50]. Otros métodos extraen mallas de triángulos irregulares (TIN) de la nube de puntos para simplificar la superficie de la que se identifican las orientaciones [51].

De igual forma, el cálculo del espaciado entre las discontinuidades puede realizarse de forma manual o semiautomática. El sistema manual se lleva a cabo mediante herramientas de medida de los softwares de gestión de nubes de puntos midiendo la distancia directamente sobre el modelo. Por otro lado, existen diversas técnicas para realizar el postproceso semiautomáticamente, algunas de ellas, asumen una persistencia infinita para el cálculo del espaciado [52] trazando líneas de muestreo que proporcionan la densidad de las discontinuidades o el espaciado medio. Otros métodos permiten calcular el espaciado normal de la familia asumiendo tanto persistencia finita como infinita basándose en las ecuaciones de los planos previamente calculadas [53]. A partir del espaciado, haciendo uso de las correlaciones propuestas por Priest, Hudson y Palsmstrong [54,55], es posible calcular el RQD de forma indirecta.

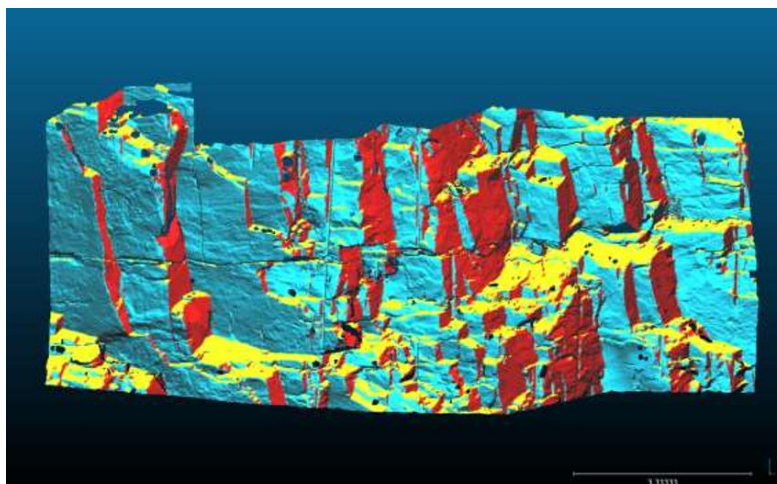


Figura 63: Identificación semiautomática de las discontinuidades mediante el uso del software Discontinuity Set Extractor (DSE). Cada color representa una familia de discontinuidades con diferentes orientaciones. Fuente: Riquelme et al., 2014.

Para analizar la rugosidad de las discontinuidades a partir de la nube de puntos, se genera un modelo TIN de la superficie de la discontinuidad y se representan en

proyección estereográfica las orientaciones de los triángulos que componen el TIN. De esta forma se obtiene información acerca del ángulo de dilatancia (i) de la discontinuidad, de forma similar a como se lleva a cabo en el método de los discos [56].

Mediante el análisis de la distribución de los polos, es posible detectar la existencia de anisotropía en el valor del ángulo de dilatancia. La variación gradual del tamaño de las facetas del TIN, permite evaluar la variación de la rugosidad con la escala.

Otro método existente consiste en elaborar perfiles de rugosidad sobre el modelo obtenido por el LiDAR. Es análisis de estos perfiles, permite llevar a cabo una parametrización objetiva de la rugosidad a través de funciones de correlación como la de Tse y Cruden [57], que permiten obtener parámetros del coeficiente de rugosidad (JRC).

Finalmente, el control de la presencia de agua mediante el LiDAR se basa en la diferencia de intensidad proporcionada por las rocas secas y húmedas. De esta forma, el análisis de la intensidad permite determinar tanto la posición del agua como su cantidad [49].

10.3. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que consiste en la obtención de imágenes en tres dimensiones de una escena a partir de dos pares de fotografías de la misma superficie (fotogramas), tomadas desde diferentes ángulos. Para ello se realiza un proceso de restitución, mediante el cual se transforma la visión cónica obtenida mediante las fotografías a la proyección ortogonal acotada o a la nube de puntos 3D que se obtiene finalmente.

El principio de la fotogrametría se basa en que cuando se toman un par de imágenes desde diferentes puntos de vista, los puntos comunes existentes en las zonas de solape de las dos fotografías cumplen el principio de colinealidad, que consiste en que el centro de proyección de la cámara, el punto de la imagen y el punto del objeto se encuentran en la misma alineación.

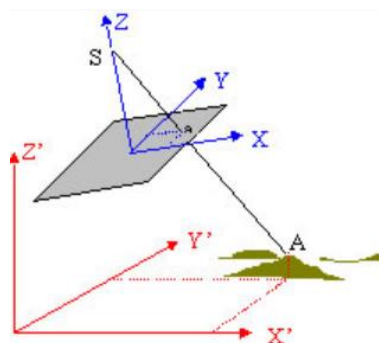


Figura 64: Principio de colinealidad, el punto de vista, cualquier punto de la placa y su punto homólogo sobre el objeto pertenecen a una línea recta. Fuente: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Otro de los principios en los que se basa la fotogrametría es el principio de haces o de triangulación fotogramétrica, que consiste en la utilización simultánea de las

coordenadas de los puntos homólogos tomados en diferentes fotografías para calcular sus coordenadas 3D intersecando todos los haces colineales.

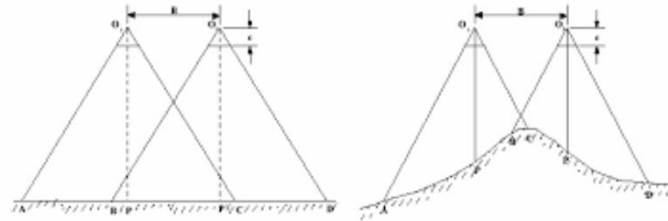


Figura 65: Principio de triangulación fotogramétrica, intersección de los haces colineales de diferentes fotografías para el cálculo de las coordenadas 3D de los puntos. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

10.3.2. Structure from Motion (SfM)

La automatización de las técnicas de fotogrametría clásica ha permitido obtener una técnica de alta resolución y bajo coste denominada Structure from Motion (SfM), basada en el principio de que la estructura 3D de las imágenes puede resolverse a partir de su superposición mediante el uso de algoritmos de Correlación Automática de Imágenes (CAI).

En este caso, las ecuaciones de colinealidad se resuelven mediante el uso de un gran número de puntos comunes en las imágenes (puntos conjugados) identificados mediante la correlación automática de un conjunto de imágenes superpuestas de forma no estructurada [58].

De esta forma, las nubes de puntos 3D obtenidas no están referidas a un sistema de coordenadas o escala que coincida con el de la realidad, porque es necesario realizar un registro de la nube de puntos en un sistema de coordenadas absoluto. Para ello es necesario conocer las coordenadas 3D de la cámara o la ubicación de una serie de puntos de control de coordenadas conocidas, lo que permite aplicar las transformaciones de escalado, rotación y translación en los tres ejes.

De esta forma, la fotogrametría digital ofrece como resultado una nube de puntos 3D georreferenciada y escalada que, al igual en las técnicas LiDAR puede ser utilizada para la obtención de parámetros del macizo rocoso o la detección de cambios a lo largo del tiempo [59]

Existen numerosos programas informáticos que permiten aplicar esta técnica de forma precisa y que proporcionan resultados de gran calidad que pueden ser utilizados para la caracterización de macizos rocosos y cálculo de movimientos, por ejemplo, Agisoft PhotoScan, Autodesk 123D Catch, Photosynth, VisualSFM, etc.

La aplicación de la técnica SfM puede realizarse con cualquier tipo de cámara, incluyendo smartphones, sin embargo, hay que tener en cuenta que la resolución de las imágenes obtenidas dependerá de la calidad de la cámara utilizada. Para conseguir resultados óptimos, se recomienda el uso de una cámara tipo réflex de un único objetivo (SLR, "Single Lens Reflex").

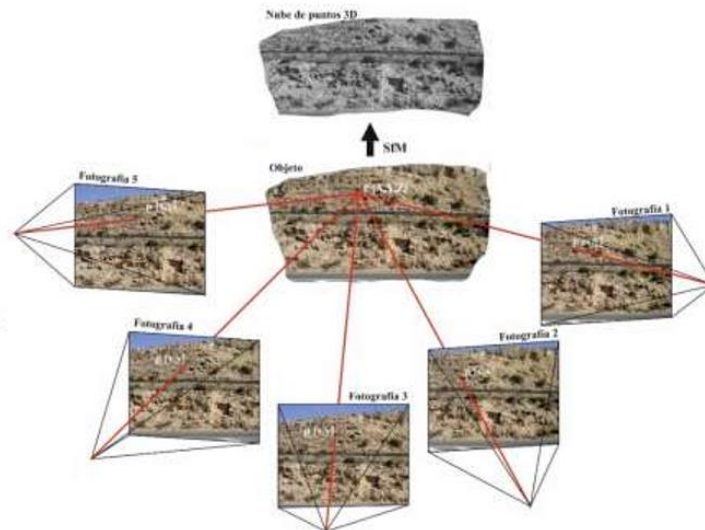


Figura 66: Técnica Structure from Motion (SfM) para la obtención de una nube de puntos 3D de un talud.
 Fuente: Jover, R.T., (2016)

Es importante tener en cuenta una serie de particularidades a la hora de realizar la toma de las imágenes para la aplicación óptima de la técnica SfM [60]:

- Tomar algunas fotografías generales del área de estudio y otras de detalle con el fin de evitar problemas de oclusión.
- Tomar fotografías desde el mayor número de direcciones posibles, ya que esto permitirá una mejor precisión de las coordenadas de los puntos debido a que facilita la determinación de la posición y orientación de la cámara.
- No hacer uso del flash de la cámara, ya que puede producir que las imágenes obtenidas presenten texturas inconsistentes que pueden dar lugar a problemas a la hora de aplicar el algoritmo de correlación automática de imágenes.
- Cuanto mayor sea el número de imágenes tomadas, mejor será la densidad de la nube de puntos y la exactitud. Especialmente, cuando existen zonas de oclusión, debe aumentarse el número de fotografías a fin de evitar zonas ciegas que pueden dar lugar a errores al aplicar la correlación automática.

10.3.3. Aplicaciones

Las aplicaciones de la fotogrametría en el área de la mecánica de rocas son prácticamente idénticas a las de LiDAR ya que las nubes de puntos que se obtienen presentan resoluciones y precisiones similares. De este modo, pueden utilizarse para el cálculo de movimientos del terreno, clasificaciones geomecánicas, levantamientos topográficos, etc.

Sin embargo, en la fotogrametría existe una limitación adicional. No funciona correctamente en condiciones de escasa o falta de iluminación. Por otro lado, la técnica SfM proporciona modelos sin escala y no orientados con la vertical por lo que a la hora de realizar estimaciones de dimensiones o volúmenes es preciso escalar adecuadamente las nubes de puntos con respecto la dirección vertical y el Norte.

10.4. SEGUIMIENTO MEDIANTE DRONES

Dentro del ámbito de la auscultación de taludes para el control de inestabilidades se está abriendo paso la utilización de recursos UAV (drones) que disponen de GPS en DRTK+GNSS (Glonass). Este sistema consiste en un módulo dual de posicionamiento que permite una lectura automática de puntos de control a través de sensores instalados en el terreno y que permite obtener una información completa de la geometría de un talud y las posibles inestabilidades que puedan desarrollarse.

Se trata de un sistema de innovación en desarrollo que implementa técnicas fotogramétricas y un equipo UAS multirrotor que permite, mediante un vuelo programado, recoger datos topográficos y fotogramétricos con el objetivo de controlar la estabilidad de taludes. Mediante este sistema, todos los datos recogidos por el UAS son enviados en tiempo real a un centro de control donde, por correlación automática, se crea el modelo digital (MDS) de las áreas cubiertas por cada vuelo. Mediante un seguimiento con una determinada periodicidad, es posible calcular los modelos diferenciales de los MDS programados, lo que permite obtener una estimación visual de los cambios producidos en la superficie. Por otro lado, se contempla también en el vuelo del dron la obtención de ortofotografías de puntos relevantes del terreno identificados con señalización mediante dianas y sensores. De esta forma, es posible obtener los desplazamientos verticales y horizontales producidos entre tales puntos y obtener así la situación actual del punto y la activación de posibles alertas.

Los métodos utilizados hasta el momento para el control de las inestabilidades en taludes, generalmente métodos topográficos basados en la utilización de estaciones de topografía laser o estaciones robóticas, precisan la instalación de bases topográficas calculadas desde donde se realizan las lecturas a los puntos de control fijados en campo, por lo que la información que se obtiene es proporcional y relativa al número de puntos o dianas fijados en el talud. Por lo que si no se han instalado en lugares representativos de la inestabilidad no proporcionarán una información relevante.

La ventaja de la utilización de equipos GPS en RTK con lectura automática de puntos de control a bordo de un UAS multirrotor, es que permite la obtención de una información integral de todo el talud y las posibles inestabilidades que puedan desarrollarse en él durante el tiempo de seguimiento que se proponga.

Las posibilidades que ofrece este equipo son muy variadas:

- Vuelo programado.
- Lectura de puntos de control en forma de dianas.
- Lectura de puntos de control de apoyo topográfico.
- Levantamiento fotogramétrico.
- Obtención de modelo en 3D, nube de puntos y ortofotoimágenes.
- Tratamiento informático de los resultados.
- Elaboración de cartografía temática de riesgos geológicos.
- Emisión de alertas, etc.

11. ANÁLISIS DE RIESGOS

En un plan de auscultación de taludes de una red tan extensa como es una infraestructura ferroviaria, es necesario establecer un sistema de evaluación del riesgo de cada talud con el objetivo de priorizar el estudio y/o actuación sobre aquellos taludes que presenten un mayor riesgo de producir daños o pérdidas sobre la infraestructura o las personas.

El riesgo que representa un talud se puede cuantificar de diversas formas, una forma sencilla es realizar esta cuantificación en función de dos variables: la **peligrosidad** natural del propio talud, definida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica y la **vulnerabilidad**, entendida como el grado de pérdida que puede provocar la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada sobre un elemento o conjunto de elementos.

De esta forma, el riesgo de un talud perteneciente a una infraestructura ferroviaria puede cuantificarse como el producto entre la peligrosidad o probabilidad de que se produzca un fenómeno de deslizamiento, desprendimiento o colapso en el talud por la vulnerabilidad o grado de afectación de la infraestructura ante tal suceso:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Una forma muy utilizada para clasificar los diferentes taludes en función del riesgo que representan es mediante el uso de las **matrices de riesgo**. Existen una infinidad de metodologías para elaborar diferentes tipos de matrices de riesgo, que pueden ser función de diferentes factores dependiendo del ámbito de aplicación.

Un ejemplo sencillo pero muy útil que se utiliza en la infraestructura de Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC) es un sistema de matrices tipo semáforo que, mediante la determinación de diversos factores a través de diferentes pequeñas matrices, construye una matriz final que cuantifica la periodicidad de vigilancia de cada talud y la urgencia de actuación sobre los mismos.

Los factores que intervienen en la construcción de las matrices son los siguientes:

- **Magnitud de la inestabilidad:** referido a la cantidad de masa movilizable debido a las inestabilidades observadas. La magnitud de la masa movilizable se cuantifica según:

MB: Muy bajo / **B:** Bajo / **M:** Medio / **A:** Alto / **MA:** Muy alto.

- **Frecuencia de las inestabilidades:** cuantificación de la periodicidad en que se producen las inestabilidades. Esta cuantificación puede llevarse a cabo mediante la observación de sucesos pasados, los cuales suelen estar bien registrados por los equipos de conservación de infraestructuras. La frecuencia de ocurrencia de las inestabilidades se cuantifica según:

MB: Muy bajo / **B:** Bajo / **M:** Medio / **A:** Alto / **MA:** Muy alto.

- **Vulnerabilidad de la infraestructura:** referido a la probabilidad de que las posibles inestabilidades del talud alcancen la infraestructura pudiendo provocar daños o accidentes. Este factor depende sobre todo de la distancia del talud a las vías, la altura a la que se produzca la inestabilidad, la geometría del talud y la existencia de bermas y su amplitud. La vulnerabilidad de la infraestructura se cuantifica según:

B: Bajo / **M:** Medio / **A:** Alto

- **Medidas de protección existentes:** cuantificación de las medidas de protección existentes en el talud y su eficacia ante posibles inestabilidades. La cuantificación de las medidas de protección existentes se realiza según:
 - **Muy bajo (MB):** no existe ningún tipo de medida de protección en el talud.
 - **Bajo (B):** medidas de protección ligeras tales como mallas de triple torsión colgadas, cuneta al pie del talud.
 - **Medio (M):** mallas de triple torsión reforzadas con cables y bulones, bulones puntuales, barreras estáticas, cunetón a pie del talud.
 - **Alto (A):** hormigón proyectado, barreras dinámicas.
 - **Muy alto (MA):** retaluzado.

De esta forma, para determinar la urgencia de actuación y control para cada talud deben completarse en orden las siguientes matrices:

1. **Matriz de peligrosidad**, cuantificada en función de la magnitud y la frecuencia de las inestabilidades, según la siguiente matriz:

		MAGNITUD				
FRECUENCIA		MA	A	M	B	MB
	MA	MA	MA	A	A	M
	A	MA	A	A	M	B
	M	A	A	M	M	B
	B	A	M	M	B	MB
	MB	M	B	B	MB	MB

Tabla 20: Matriz de peligrosidad obtenida en función de la magnitud y frecuencia de las inestabilidades.
Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC).

2. **Matriz de riesgo**, cuantificada a partir de la vulnerabilidad de la infraestructura y del resultado obtenido en la matriz de peligrosidad:

		PELIGROSIDAD				
VULNERABILIDAD		MA	A	M	B	MB
	A	MA	MA	A	M	B
	M	MA	A	M	B	MB
	B	A	M	B	MB	MB

Tabla 21: Matriz de riesgo obtenida en función de la vulnerabilidad de la infraestructura y el valor de la peligrosidad del talud. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC).

3. **Matriz de vigilancia**, es el resultado final obtenido en función de las medidas de protección existentes en el talud y el resultado obtenido en la matriz de riesgo:

RIESGO	PROTECCIÓN ACTUAL					
		MA	A	M	B	MB
	MA	4	3	2	1	1
	A	4	3	2	1	1
	M	4	3	2	2	1
	B	4	3	3	2	2
	MB	4	4	4	3	3

Tabla 22: Matriz de vigilancia obtenida en función del estado de protección del talud y el valor del riesgo del talud y la infraestructura. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC).

	VIGILÀNCIA	ACTUACIONES
1	Muy Alta	Urgentes
2	Alta	A corto plazo
3	Media	A medio plazo
4	Baja	A largo plazo

Tabla 23: Matriz de vigilancia y urgencia de actuación necesaria. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC).

12. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE APLICACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE CATALUÑA

Tal y como se ha expuesto anteriormente, existen diferentes métodos de predicción de inestabilidades. Para el estudio de la monitorización de los taludes colindantes a infraestructuras ferroviarias, los métodos de análisis de deformaciones y de control de la variación de las presiones intersticiales en el talud resultan los más eficientes, ya que, siendo el objetivo detectar inestabilidades locales de cualquier tipología, dentro de un área muy extensa, que pueden causar graves daños y pérdidas, estos dos métodos resultan más efectivos al basar las predicciones en cambios o variaciones localizados en cada área específica a analizar y no en correlaciones o datos probabilísticos relacionados con sucesos pasados.

La predicción de la inestabilidad de taludes en base al control de la variación de las presiones intersticiales se centra en el análisis de los factores desencadenantes en base a la idea de que la medición de causas y efectos, junto con su correcta interpretación y correlación, permitirá encontrar las soluciones óptimas para corregir las inestabilidades y prevenir o minimizar sus causas.

Por otro lado, el método de predicción de inestabilidades basado en el principio de Skempton [19], propone que antes de la aparición de daños o deterioros visibles, se producen cambios o deformaciones en el terreno que, a veces, no son observables a simple vista pero que implican la presencia de inestabilidades. La monitorización continua de un talud permitirá localizar tales cambios, previniendo posibles daños o pérdidas causados por tales movimientos.

El control y medición de las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras de un sistema permite el cálculo del factor de seguridad de un talud o estructura que, junto con el

establecimiento de valores límites aceptables y la instalación de un sistema de alerta temprana, permitirá la prevención de desastres y la mitigación de daños debidos a inestabilidades de taludes o fallos de las estructuras.

En el ámbito de monitorización de vías ferroviarias, más específicamente en el control de los taludes colindantes a las vías, hay que tener en cuenta que no se trata de un sistema aislado a estudiar, si no de una extensa red que cubre una gran área tanto en espacio como en posibles patologías. De esta forma, para crear un sistema de monitorización completo que permita prever las inestabilidades, será necesario un profundo estudio previo de todos los posibles escenarios y de los sistemas de instrumentación o seguimiento más eficientes para cada lugar en función de un gran número de condicionantes.

12.1. Área de estudio

La principal problemática que presenta la red ferroviaria de Cataluña es la gran variedad y complejidad de los sistemas geológicos y geomorfológicos que atraviesa.

Cataluña fue el primer territorio en la Península Ibérica en tener ferrocarril, con la inauguración de la primera línea entre Barcelona y Mataró en octubre de 1848. Antes de la entrada del siglo XX ya se había construido prácticamente el 80% de la longitud de vía existente en la actualidad, por lo que es importante tener en cuenta que, pese a que se han modernizado los trenes, la red viaria sigue siendo prácticamente la misma que hace 100 años.

Las principales líneas ferroviarias presentes en Cataluña son propiedad de las empresas ADIF y Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC) operadas por Renfe Operadora y la misma FGC respectivamente. En la *Figura 67* puede observarse el mapa de la red ferroviaria de Cataluña diferenciada según el operador de las líneas. Tal y como puede observarse, la mayor parte de la infraestructura es propiedad de la compañía ADIF.



Figura 67: Mapa de infraestructuras ferroviarias en Cataluña diferenciadas según la compañía que las opera. Fuente: Creación propia mediante ArcGis.

Para simplificar el estudio, y teniendo en cuenta que las diferentes compañías ferroviarias operan de forma independiente, el estudio se centrará en la red ferroviaria perteneciente a los Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC) ya que, a diferencia de ADIF, ésta opera únicamente en Cataluña. La red de FGC gestiona corredores ferroviarios de diferente ancho de vía, líneas de mercancías, trenes cremallera, líneas de metro y funiculares. A continuación, se resumen las líneas operadas por FGC junto con información acerca de la longitud y ancho de las vías:

- Líneas de metro de FGC.
- Funicular → 2,2 km.
- Cremallera de Núria → 12,45 km de vía estrecha (1000 mm).
- Cremallera de Montserrat → 5,19 km de vía estrecha (1000 mm).
- Ferrocarril turístico (Tren del Cement) → 3,1 km de ancho de vía 600 mm.
- Línea Barcelona – Vallés → 57,03 km de vía estándar (1435 mm).
- Línea Llobregat – Anoia → 98,23 km de vía estrecha (1000 mm).
- Línea Lleida – La Pobla de Segur → 89,1 km de ancho ibérico (1668 mm).
- Líneas de mercancías → 38,18 km de vía estrecha (1000 mm).



Figura 68: Mapa de Cataluña con las líneas ferroviarias pertenecientes a FGC. Fuente: Creación propia mediante ArcGis.

En la *Figura 69* puede observarse un modelo digital de elevaciones de Cataluña en el que puede apreciarse la variada orografía atravesada por la infraestructura ferroviaria, que cuenta con diferencias altimétricas que van desde el nivel del mar a aproximadamente 3.000 m altitud.

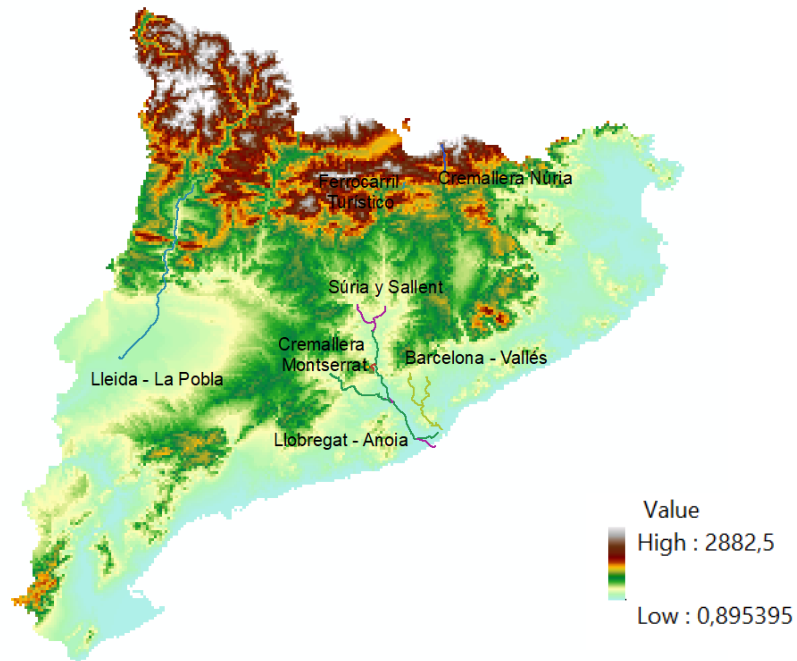


Figura 69: Modelo digital de elevaciones de Cataluña junto a las líneas ferroviarias de FGC. Fuente: Creación propia mediante ArcGis.

En la *Figura 70* pueden observarse las macro-discontinuidades existentes que atraviesan las líneas ferroviarias estudiadas, y en la *Figura 71* las diferentes unidades geológicas existentes, clasificadas en función del tipo de depósito y su época.

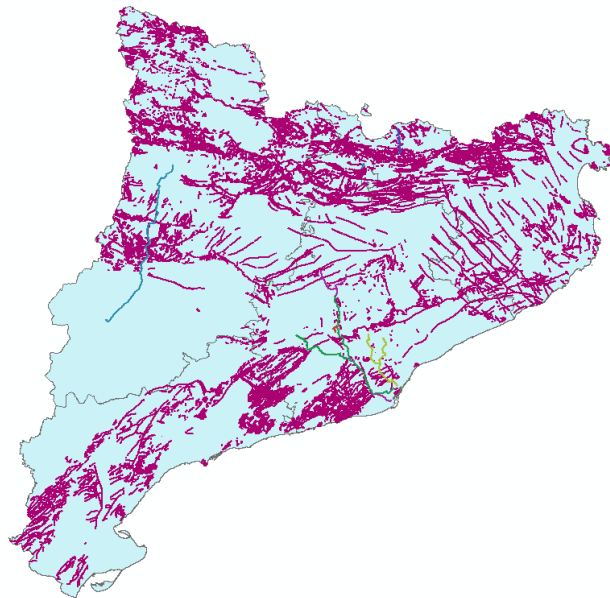


Figura 70: Sistema de macrodiscontinuidades existente en Cataluña junto a las líneas ferroviarias pertenecientes a FGC. Fuente: Creación propia mediante ArcGis

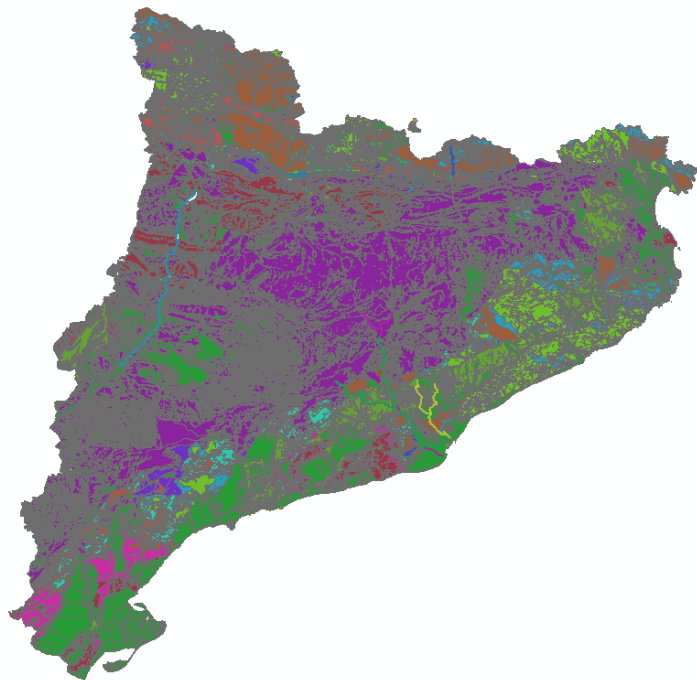


Figura 71: Diferents dipòsits geològics (diferenciats segons la seva edat) en Catalunya juntament amb les línies ferroviàries de FGC. Font: Creació pròpia mitjançant ArcGis

Tal i com es pot observar en la *Figura 71*, la complexitat geològica existent a Catalunya és tal, que no resulta observable a l'escala presentada en la figura.

Per a una primera aproximació d'aquest estudi s'han seleccionat dues línies de la infraestructura ferroviària de FGC:

- Lleida – La Pobla.
- Barcelona – Vallès.

Estes dues línies presenten un elevat risc degut a dos factors totalment diferents. Per un costat, la línia Lleida – La Pobla travessa una orogènia molt complexa i inestable en alguns punts, el que suposa una alta perillositat per a la infraestructura ferroviària. Per l'altre costat, la línia Barcelona – Vallès és la que més afluència de passatgers recull de tota la infraestructura (més de 60 milions de passatgers al any) per la qual la vulnerabilitat d'aquesta línia és de les més elevades, ja que qualsevol accident podria suposar una enorme quantitat de pèrdues humanes a la vegada que econòmiques.

Tal com s'ha explicat en capítols anteriors, per realitzar un correcte disseny d'auscultació de taluds és necessària la realització de campanyes de camp amb l'objectiu d'identificar les característiques intrínseques dels taluds, els factors externs que poden influir sobre ells i de aquesta manera determinar les possibles inestabilitats que puguin produir-se.

Sin embargo, la realización estudios de campo y proyectos de estudio de estabilidad de los taludes colindantes a una infraestructura ferroviaria no puede ser ejecutada por cualquiera ya que existe un complejo sistema de seguridad que debe cumplirse para poder acceder a pie a la infraestructura. Entre las medidas de seguridad requeridas se

encuentran ir acompañado de personal con formación específica en seguridad ferroviaria (jefe de brigada o protector de vía), obtener un permiso de entrada por parte de FGC que estará limitado a un día específico y a los tramos de la infraestructura especificados en el permiso, comunicar en tiempo real mediante una llamada telefónica del momento de entrada y salida al tramo que se desee visitar, etc.

En el año 2001 el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) inició trabajos de seguimiento geológico de los taludes adyacentes a la red ferroviaria perteneciente a FGC por lo que actualmente existe una extensa base de datos con información destinada a la prevención de riesgos de origen geológico. A raíz de estos estudios, se han elaborado unas fichas tipo inventario de taludes (*Figura 72*) que incluyen la siguiente información:

- **IDENTIFICACIÓN Y SITUACIÓN DEL TALUD**

- Nomenclatura del talud.
- Línea ferroviaria en la que se encuentra.
- Sector de la línea ferroviaria.
- Punto kilométrico inicial y final.
- Mapa de situación en escala 1/5000.
- Fotografía general del talud.

- **CATEGORÍA DEL TALUD SEGÚN EL RIESGO**

Tal como se ha descrito en el *Capítulo 10* de este documento, existe una serie de matrices utilizadas por FGC para realizar una aproximación de la peligrosidad, riesgo y necesidad de actuación sobre los taludes y así determinar criterios de actuación tras las inspecciones de taludes. Se trata de un sistema de matrices interconectado formado por:

- Matriz de peligrosidad.
- Matriz de riesgo.
- Matriz de vigilancia.

- **RECOMENDACIONES DE ACTUACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Descripción de actuaciones de estabilización y mantenimiento necesarias en el talud en función a las patologías observadas.

- **ACTUACIONES DE ESTABILIZACIÓN Y PROTECCIÓN PRESENTES**

Descripción de las actuaciones de estabilización presentes en el talud incluyendo los puntos kilométricos en los que se encuentran, características principales y estado de las mismas en el momento de la observación.

- **DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA**

- Altura e inclinación del talud.
- Descripción de las diferentes geologías que forman el talud incluyendo información sobre el estado de meteorización y caracterización de las discontinuidades presentes.
- Descripción y origen de las inestabilidades observadas.

- CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA (SMR)



- Dirección y buzamiento de las principales familias de discontinuidades.
- Características y estado de las juntas (ondulación, rugosidad, espaciado, continuidad, presencia o no de agua, etc.)
- Valor SMR y clasificación según el mismo.

- OBSERVACIONES

Información relevante sobre inestabilidades anteriores, espacio entre el talud y la infraestructura, etc.

- DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA

Documentación fotográfica junto con descripción y localización de las principales patologías detectadas en el talud.

FGC Ferrocarrils de Catalunya		ICGC Cartogràfic i Geològic de Catalunya		TALÚS 2d																																																																																											
CATÀLEG TALUSSOS Línies Sarrià - Les Planes Modificació 2014																																																																																															
SECTOR: Vallvidrera - Les Planes		PK: 3+825	PK: 4+000																																																																																												
ORIENTACIÓ: 149°-329°																																																																																															
																																																																																															
MATRIU DE PERILLOSITAT <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="5">Magnitud</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MA</th> <th>A</th> <th>M</th> <th>B</th> <th>MB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5">Frequència</td> <td>MA</td> <td>MA</td> <td>MA</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>MA</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>M</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>MB</td> </tr> <tr> <td>MB</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>M</td> <td>MB</td> <td>MB</td> </tr> </tbody> </table>				Magnitud							MA	A	M	B	MB	Frequència	MA	MA	MA	A	A	M	A	MA	A	A	M	B	M	A	A	M	M	B	B	A	M	M	B	MB	MB	M	B	M	MB	MB	MATRIU DE VIGILÀNCIA <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="5">Protecció actual</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>S</th> <th>MA</th> <th>A</th> <th>M</th> <th>B</th> <th>MB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5">Risc</td> <td>MA</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>MB</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>					Protecció actual							S	MA	A	M	B	MB	Risc	MA	4	3	2	1	1	A	4	3	2	1	1	M	4	3	2	2	1	B	4	3	3	2	2	MB	4	4	4	3	3
		Magnitud																																																																																													
		MA	A	M	B	MB																																																																																									
Frequència	MA	MA	MA	A	A	M																																																																																									
	A	MA	A	A	M	B																																																																																									
	M	A	A	M	M	B																																																																																									
	B	A	M	M	B	MB																																																																																									
	MB	M	B	M	MB	MB																																																																																									
		Protecció actual																																																																																													
		S	MA	A	M	B	MB																																																																																								
Risc	MA	4	3	2	1	1																																																																																									
	A	4	3	2	1	1																																																																																									
	M	4	3	2	2	1																																																																																									
	B	4	3	3	2	2																																																																																									
	MB	4	4	4	3	3																																																																																									
MATRIU DE RISC <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="5">Peril·lositat</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>R</th> <th>MA</th> <th>A</th> <th>M</th> <th>B</th> <th>MB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Vulnerabilitat del tren</td> <td>A</td> <td>MA</td> <td>MA</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>MA</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>MB</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>MB</td> <td>MB</td> </tr> <tr> <td>MB</td> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>MB</td> <td>MB</td> </tr> </tbody> </table>				Peril·lositat							R	MA	A	M	B	MB	Vulnerabilitat del tren	A	MA	MA	A	M	B	M	MA	A	M	B	MB	B	A	M	B	MB	MB	MB	A	M	B	MB	MB	<table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>Vigilància</th> <th>Actuacions</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Molt alta</td> <td>Urgents</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Alta</td> <td>A curt termini</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Mitjana</td> <td>A mitjà termini</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Baixa</td> <td>A llarg termini</td> </tr> </tbody> </table>			S	Vigilància	Actuacions	1	Molt alta	Urgents	2	Alta	A curt termini	3	Mitjana	A mitjà termini	4	Baixa	A llarg termini																																				
		Peril·lositat																																																																																													
		R	MA	A	M	B	MB																																																																																								
Vulnerabilitat del tren	A	MA	MA	A	M	B																																																																																									
	M	MA	A	M	B	MB																																																																																									
	B	A	M	B	MB	MB																																																																																									
	MB	A	M	B	MB	MB																																																																																									
S	Vigilància	Actuacions																																																																																													
1	Molt alta	Urgents																																																																																													
2	Alta	A curt termini																																																																																													
3	Mitjana	A mitjà termini																																																																																													
4	Baixa	A llarg termini																																																																																													
CATEGORIA TALÚS: 3																																																																																															
RECOMANACIONS D'ACTUACIÓ I MANTENIMENT: Reparació del mur. Neteja de cuneta.																																																																																															
DESCRIPCIÓ DE LES ACTUACIONS D'ESTABILITZACIÓ O DEFENSA REALITZADES: - Pks 3+825 - 3+860 recobriments amb morter sense armar amb gruixos entre 1 - 2 cm.																																																																																															

DESCRIPCIÓ GEOLÒGICA -GEOMORFOLÒGICA

Talús situat a l'extrem nord-est de la traça que presenta alçades màximes de 7 m i una inclinació d'entre 60° - 70°.

Constituit per pissarres paleozoiques molt esquistosades amb nivell quarzífics d'entre 1 - 6 cm, l'estat de meteorització és moderat. Els espais entre plans d'esquistositat (S=342/57) són mil·limètrics. Són superfícies tancades, molt contínues, llises i localment ondulades. Apareixen betes de quars interesquistosades d'entre 1 i 3 cm de gruix.

Les inestabilitats provenen de la intersecció de la fracturació amb l'esquistositat el que produeix despenaments per individualització de blocs de mida centimètrica de la part intermèdia i alta del talús majorment per trencades en falca.

CLASSIFICACIÓ GEOMECÀNICA (SMR):

Existència de les tres famílies de diaclasis: J1:231/80, J2:140/64 i J3:068/65. Són juntes planes o una mica ondulades, llises, i tenen espais entre 0,5 m i 3,0 m i una continuïtat d'entre 5 i 8 m.

Es classifiquem segons el SMR (Slope Mass Rating) com un SMR= 45 CLASSE IIb. Segons aquesta classificació aquest és un talús parcialment estable dins la seva classe més baixa.

OBSERVACIONS

Nombroses zones de despenaments recents les més significatives situades en els PKs 0+085, 0+090, 0+103 i 0+110.

Abundant material caigut de mida centimètrica al peu del talús.

Entre el talús i la via existeix una distància és d'entre 1.8 m, amb una cuneta de 60x30 cm

FOTOGRAFIES



Detall de la degradació del mur.

PK 3+895: Entrada d'aigua de la finca adjacent a les vies.



Material caigut al peu del talús

Figura 72: Ficha tipo inventario elaborada por el Instituto Cartográfico i Geológico de Cataluña (ICGC) para FGC. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC).

La recogida de datos y su continua actualización supone un arduo trabajo que conlleva un gran gasto tanto en el aspecto temporal como en el económico, lo que supone una de las principales motivaciones para la realización del presente estudio.

Sin embargo, toda esta información constituye una base de datos muy útil para la realización del seguimiento y planificación de mitigación de riesgos asociados a los taludes adyacentes a la infraestructura ferroviaria, y puede suponer una pieza clave para para el desarrollo de una planificación de monitorización de taludes.

Tal y como se ha mencionado, un factor esencial para la aplicación de los diferentes métodos de monitorización es la diferenciación entre taludes en roca y taludes en suelo. Por otro lado, la identificación de los taludes en roca en función del valor de la clasificación SMR, permite determinar el estado general de los taludes, lo que permitirá determinar la frecuencia de monitorización necesaria en cada caso. La obtención de esta información ha sido posible gracias a la información facilitada por el personal de I+D de FGC, extraída de las fichas inventario de taludes mencionadas. Finalmente, la longitud de las vías ha sido extraída mediante el programa de visualización ArcGis a partir de información geográfica georreferenciada disponible públicamente en el Hipermapa de la Generalitat de Cataluña [61].

La longitud en kilómetros de las líneas ferroviarias consideradas en el estudio, la contabilización de taludes en suelo y en roca y el desglosado de los taludes en roca según el valor del índice SMR pueden consultarse en la *Tabla 24* y la *Tabla 25*.

	Longitud (km)	Nº Taludes en suelo	Nº Taludes en roca
Barcelona – Vallés	57,03	48	29
Lleida – La Pobla	89,1	100	92

Tabla 24: Longitud de línea y N.º de taludes en suelo y en roca de las líneas Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobla pertenecientes a FGC. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC).

SMR	Nº de taludes	
	BARCELONA VALLÉS	LLEIDA – LA POBLA
Ia		2
Ib		10
IIa		19
IIb		26
IIIa	3	22
IIIb	23	8
IVa	3	4
IVb		1
Va		0
Vb		0

Tabla 25: Desglosado de los taludes en roca de las líneas Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobla. Fuente: Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC).

12.2. Principales problemas geotécnicos

Tener claro los diferentes problemas geotécnicos que pueden producirse en un talud es crucial para la ejecución de un correcto diseño del sistema de monitorización, ya que permite determinar qué variables deben controlarse para asegurar la estabilidad.

Los principales problemas geotécnicos que pueden provocar problemas a la infraestructura ferroviaria son los deslizamientos y las caídas de bloques sobre las vías, en el caso de los taludes de desmonte y los deslizamientos o hundimientos, en caso de los taludes en terraplén.

Los deslizamientos y hundimientos se producen en aquellos taludes formados por suelos o en aquellos en los que existe una gran cantidad de materiales blandos o rocas muy fracturadas.

Los desprendimientos rocosos se producirán en aquellos taludes formados por rocas fracturadas o en taludes formados por materiales heterogéneos.

En los casos en los que coexisten materiales de diferente competencia, las inestabilidades son causadas por procesos de erosión diferencial o por la lubricación o lavado de los materiales más blandos debido a la infiltración del agua en el macizo. Este tipo de sistemas pueden dar lugar a desprendimientos rocosos, como en el caso de los macizos formados por materiales coluviales; a colapsos, en los casos en los que se produce socavación de la base del talud o a deslizamientos debido a la lubricación o lavado de las capas más blandas, como en el caso de las pizarras.

En la *Figura 73* puede observarse un talud de la línea Llobregat – Anoia con riesgo de colapso y caída de bloques debido a procesos de erosión diferencial y socavación de la base del talud. En la *Figura 74* aparece el caso de un deslizamiento y lavado de los materiales más blandos que provoca una sobrecarga de la barrera estática de traviesas que protege la vía e individualización de los bloques más competentes situados en la cabecera del talud.



Figura 73: Desprendimientos y socavación de la base del talud debido a procesos de erosión diferencial en un talud de la Línea Llobregat – Anoia de FGC. Fuente: Propia.



Figura 74: Deslizamiento de tierras e individualización de bloques en un talud de propiedades heterogéneas en la línea Lleida – La Pobla de FGC. Fuente: Propia

Otro aspecto a tener en cuenta en un proyecto de monitorización es la estabilidad de los muros o estructuras presentes en la infraestructura, que pueden sufrir roturas o colapsos debido a sobrecargas o envejecimiento de los materiales que los forman. En la *Figura 75* se puede observar un falso túnel situado en la línea Lleida – La Poblea con una grieta que puede comprometer la estabilidad de la estructura.

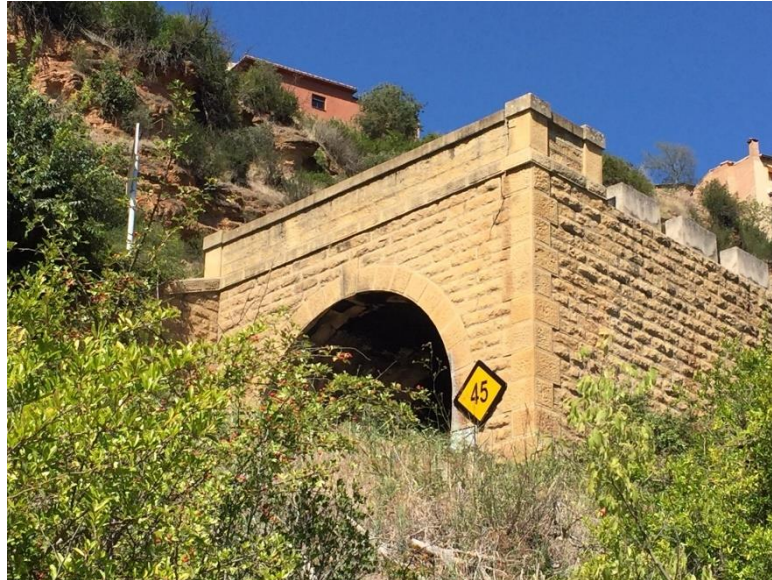


Figura 75: Formación de una grieta en un falso túnel presente en la línea Lleida – La Poblea.
Fuente: Propia.

12.3. Ventajas y limitaciones de los medios de monitorización existentes

Los métodos de instrumentación estudiados que permiten cierta automatización del proceso de auscultación de taludes pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Sensores instalados in situ.
- Sistemas de teledetección.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y sus limitaciones a la hora de llevar a cabo un programa de monitorización de los taludes colindantes a las vías ferroviarias, a la vez que un gran abanico de opciones dentro de cada método.

De forma general, puede afirmarse que los sensores instalados in situ constituyen la mejor opción para conseguir un sistema de auscultación completamente automatizado y de toma de datos continua, siendo capaz de monitorizar tanto los factores desencadenantes como los cambios o movimientos que puedan producirse en consecuencia. Sin embargo, estos sensores toman mediciones puntuales en lugares concretos, por lo que no proporcionan una cobertura global de la zona, lo cual no resulta eficiente cuando se pretende realizar una auscultación predictiva de un área tan extensa y compleja como supone una infraestructura ferroviaria. Otra limitación a tener en cuenta es que la transmisión de los datos obtenidos se lleva a cabo a través de radio frecuencias basadas en enlaces terrestres, de forma que en los lugares donde no llegue

la cobertura móvil, la transmisión de los datos en tiempo real no resultará viable mediante la tecnología existente en la actualidad.

Los sistemas de teledetección suponen una cobertura global del área de estudio, sin embargo, la completa automatización del proceso resulta más complicada y no permite el control de los factores desencadenantes.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las posibilidades de aplicación de los sistemas de teledetección van mucho más allá del simple control de las variaciones o cambios producidos en el terreno. Mediante algunos sistemas de teledetección es posible analizar el estado de las actuaciones existentes en los taludes, comprobar el estado de los cables de catenaria, el estado de las vías, la vegetación existente en el talud, etc.

Teniendo en cuenta estas limitaciones y el sistema tan amplio y complejo puede implicar una infraestructura ferroviaria, puede afirmarse que, con los medios disponibles en la actualidad, resulta complicado desarrollar un sistema totalmente automático mediante la instalación de sensores in situ que asegure el control y predicción de todas las posibles inestabilidades que puedan sufrir los taludes colindantes a las vías ferroviarias. Por otro lado, la auscultación mediante sistemas de teledetección es una práctica que está avanzando a pasos agigantados pero que, tal como se ha comentado, todavía tiene algunas limitaciones.

A partir de la información obtenida acerca de los diferentes métodos de auscultación, junto con la experiencia propia acerca del control de la estabilidad de taludes, se ha llegado a la conclusión de que las inestabilidades asociadas a deslizamientos e hundimientos podrán ser monitorizados de forma automática mediante la instalación de sensores in situ, ya que este tipo de patologías normalmente afectan a un área del talud considerable, de manera que, mediante un buen criterio de instalación de sensores y la correcta interpretación y correlación de los datos obtenidos será posible prever y prevenir este tipo de inestabilidades.

Por otro lado, las inestabilidades asociadas a desprendimientos rocosos difícilmente podrán ser monitorizados mediante este tipo de sensores, debido al comportamiento altamente anisotrópico de los macizos rocosos fracturados. Las familias de discontinuidades existentes en un talud constituyen un sistema muy variado y complejo que puede afectar a masas de material muy variable, por lo que, para realizar un control mediante sensores instalados in situ se necesitaría un número enorme de sensores instalados para poder asegurar el control global de un talud, lo cual no resulta viable ni eficiente. Para realizar una correcta predicción de este tipo de inestabilidades es necesario un control global de la evolución de las discontinuidades o de las deformaciones que puedan producirse en el talud, por lo que para automatizar este proceso se deberá recurrir a los sistemas de teledetección.

De esta forma, la aplicación de sensores instalados in situ será aplicable exclusivamente a los casos de inestabilidades de tipo global o que afecten una masa considerable del talud, tales como deslizamientos o colapsos que puedan ocurrir en macizos formados por suelos o macizos heterogéneos en los que las inestabilidades sean debidas a deslizamientos o colapsos. Por su parte, las inestabilidades de tipo local, existentes en macizos rocosos fracturados o en macizos heterogéneos en los que se puedan producir

desprendimientos debido a la erosión diferencial de los materiales más blandos, requerirán el uso de técnicas de teledetección con el fin de asegurar una cobertura total del control de las posibles patologías presentes en el talud.

Teniendo en cuenta que las técnicas de teledetección son aplicables a prácticamente todos los casos de inestabilidad (tanto macizos en suelo, como en roca y macizos heterogéneos) y los sensores instalados in situ exclusivamente los macizos formados por suelos, será necesario realizar un estudio económico para determinar la eficiencia de utilizar diferentes métodos en función del caso de estudio o, por el contrario, implementar los sistemas de teledetección para el estudio completo.

En la siguiente tabla se resumen las ventajas e inconvenientes de los sensores instalados in situ y de los sistemas de teledetección:

	Sensores in situ	Sistemas de Teledetección
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Adquisición y procesamiento de datos en tiempo real. · Toma de medidas totalmente automática. · Medición de factores desencadenantes. 	<ul style="list-style-type: none"> · Mediciones globales. · Posibilidad de comprobar el estado de actuaciones realizadas sobre taludes, detección de material acumulado en cunetas, control de estructuras y catenaria, estado de la vía, etc.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> · Mediciones locales. · No permiten medición de propiedades geomecánicas en taludes. · Imposibilidad de transmisión de datos en zonas sin cobertura móvil. 	<ul style="list-style-type: none"> · Adquisición de datos semi-automática. · Sólo miden factores condicionantes del talud. · Mayor complejidad de procesamiento de datos.

Tabla 26: Ventajas y limitaciones de los sensores in situ y de los sistemas de teledetección. Fuente: Elaboración propia.

12.3.1. Sistemas de Teledetección

La **Interferometría SAR Diferencial** es una técnica económica comparada con otros métodos, sin embargo, está más enfocada al estudio de grandes movimientos de ladera. Incluso en su variación, Ground Based SAR, realizado desde plataforma terrestre, con el cual es posible realizar el seguimiento con una mayor resolución espacial y precisión en la medida de los desplazamientos, este método no resulta eficiente para el caso de estudio debido a que no permite el cálculo de los parámetros geomecánicos de los macizos rocosos.

La **fotogrametría** resulta también un método relativamente económico, ya que el instrumento de medida consiste simplemente en una cámara fotográfica, cuya calidad determinará en gran medida la precisión de los datos. Se trata de un instrumento ligero y fácil de transportar, sin embargo, al igual que los sistemas de teledetección RADAR, requiere ciertas operaciones para el correcto procesamiento de las imágenes obtenidas y resulta complicada la completa automatización del proceso de toma de datos.

El sistema **Laser Scanner (LiDAR)** representa la técnica menos económica de los sistemas de teledetección, ya que el equipo LiDAR tiene un coste hasta 10 veces mayor que una cámara fotográfica profesional. También mucho más pesado y aparatoso, ya que un instrumento LiDAR puede llegar a pesar aproximadamente 10-15 kg, a lo que hay que añadirle el peso del trípode, sin embargo, los avances tecnológicos recientes han permitido el desarrollo de aparatos mucho más ligeros y manejables llegando a

conseguir sistemas completos con un peso menor de 5 kg para su uso a bordo de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Pese que la precisión de los datos obtenidos mediante LiDAR y fotogrametría son muy similares, la técnica LiDAR resuelve algunas limitaciones que posee la fotogrametría:

- Limitaciones de visibilidad en cuanto a distancia entre imágenes adyacentes, como vegetación alta y espesa, o altas distancias al objeto, ya que tiene un rango de alcance $z/B > 10$.
- Limitaciones en condiciones de baja visibilidad o meteorología adversa.
- Limitaciones en los trabajos de procesamiento de los datos.

La técnica LiDAR es capaz de detectar de forma independiente las coordenadas de edificios, árboles, estructuras, etc. dentro del grupo de datos. Esta es una de las grandes ventajas de este sistema, ya que, además permite “ver” a través de la vegetación. De esta forma es posible separar la información de los objetos ajenos al terreno y obtener un MDE del terreno excluyendo elementos ajenos como puede ser la vegetación, lo que resulta imposible mediante fotogrametría. Además, los avances tecnológicos aplicados a esta técnica han conseguido que este filtrado de los datos obtenidos pueda hacerse de forma semi-automática mediante diversos programas informáticos de tratamiento de imagen, lo que permite una monitorización prácticamente continua y una visualización casi inmediata del modelo digital del terreno obtenido.

En fotogrametría puede utilizarse la misma tecnología para realizar el procesamiento de los datos de forma semi-automática, sin embargo, el hecho de que la técnica LiDAR permita una obtención directa de las coordenadas X, Y, Z de los puntos del terreno hace más rápida y sencilla la obtención de los modelos digitales del terreno (MDT).

Por otro lado, el par de imágenes necesario para la obtención de las coordenadas de los puntos en fotogrametría genera zonas de sombra donde no se obtiene información. La técnica LiDAR supera esta limitación gracias a la rotación del espejo que desvía el haz láser y a su penetrabilidad a través de algunos elementos. Este hecho es muy importante ya que en la mayoría de los taludes rocosos existen recovecos y zonas ocultas no observables desde determinados ángulos de visión.

Otra enorme ventaja del sistema LiDAR consiste en las condiciones de operabilidad del sensor. Gracias a que se trata de un método activo, la técnica láser no depende de las condiciones de iluminación, lo que le permite trabajar en condiciones de baja iluminación, bajo condiciones meteorológicas adversas o presencia de polvo, algo que queda fuera del alcance de la fotogrametría.

En cuanto a la toma de datos, en el caso del LiDAR, la experiencia del operador no tendrá una gran influencia en la calidad de la información obtenida, mientras que en fotogrametría deben tenerse en cuenta algunas especificaciones y condiciones a la hora de tomar las fotografías.

Finalmente, otra ventaja del sistema LiDAR es el gran abanico de posibilidades que ofrece. Aunque no sea objeto de este trabajo, la integración de la técnica LiDAR en el control de la infraestructura ferroviaria no se limita al control de los taludes, si no que podría abarcar la superestructura completa. Por ejemplo, la reflectancia producida por determinadas estructuras metálicas queda perfectamente representada en el registro de

los modelos obtenidos. A pesar de que los cables tienen un diámetro menor que el del láser, su condición metálica permite su registro en el modelo, aportando información que difícilmente podrá obtenerse mediante otras técnicas. Este hecho abre un abanico de opciones en el control de diferentes elementos como pueden ser los cables de catenaria o de fibra óptica existentes en la infraestructura ferroviaria y cuyo control es de vital importancia.

Todas estas características son las que hacen del LiDAR la técnica de teledetección remota más eficiente, teniendo en cuenta los aspectos técnicos, para la monitorización de los taludes colindantes a las redes ferroviarias entre otras muchas otras aplicaciones.

Ahora bien, a la hora de elegir la plataforma de captación de datos más eficiente para el ámbito de las infraestructuras ferroviarias, los métodos menos eficientes son el sistema LiDAR aerotransportado (sobre avión o helicóptero) y el Scanner Laser Terrestre (TLS). En primer caso, es debido a la notable disminución de la resolución y precisión de los datos obtenidos desde aviones o helicópteros como consecuencia de la distancia de adquisición de los datos. La resolución de los datos obtenida es de orden métrico, lo que no permite la obtención de los parámetros geomecánicos de los taludes en roca o la detección de cambios de orden milimétrico. Por otro lado, el sistema láser terrestre es el que mayor resolución y precisión proporciona (resolución milimétrica), sin embargo, su aplicación a la monitorización de todos los taludes de una infraestructura ferroviaria completa supondría un enorme gasto en la toma de las mediciones ya que sería necesario estacionar el aparato una cantidad innumerable de veces para completar un solo barrido de la infraestructura, lo que resulta inviable en este ámbito de aplicación.

De esta forma, el mejor método, técnicamente, aplicable a la infraestructura ferroviaria será el sistema LiDAR sobre plataforma móvil.

En el caso del uso de vehículos aéreos no tripulados, debe tenerse en cuenta que, debido al margen de error existente en el posicionamiento, la precisión de los modelos absolutos será como máximo de 14-16 mm, mientras que en relativo, tomando los datos cerca del objetivo, se pueden conseguir modelos con precisión de 6-7 mm, margen que no sería válido para estudiar movimientos desencadenantes de deslizamientos u obras de fábrica que sustenten un talud, aunque sí para el estudio de parámetros geomecánicos. Por otro lado, la legislación en torno a drones, existente en España, es todavía muy restrictiva. Para alejar un dron más allá de 500 metros del piloto hace falta segregar el espacio aéreo (pedir un permiso especial de vuelo). Una vez concedido, el piloto, que siempre tiene que estar al mando desde un lugar durante toda la operación, podría enviar el dron con una misión pre-cargada que recorriese el corredor de la vía a estudiar. Si el trazado es largo, sería conveniente utilizar un dron de tipo ala fija ya que estos tienen mayor autonomía de vuelo que los de tipo multi-rotor, sin embargo, tienen peor maniobrabilidad. Para realizar diferentes tomas a una distancia válida del talud, tendrían que hacer varias pasadas a poca altura y necesitan mucho espacio para hacer cada giro y volver a pasar. Finalmente, cualquier problema de vuelo que tuviera el dron, podría poner en peligro la seguridad de la infraestructura ferroviaria lo que resulta una razón de peso para no considerar esta opción ya que va completamente en contra del objetivo principal de este proyecto.

De esta forma, el sistema óptimo en el caso de estudio será el LiDAR instalado sobre el mismo tren (train-borne LiDAR). Este es un sistema relativo, al igual que en el caso del dron, sin embargo, mediante la toma de puntos de control GPS en la zona a estudiar, es posible corregir la posición cada vez que se repita el estudio con el fin de conseguir precisiones milimétricas.

En la *Tabla 27* se puede observar un resumen de las principales características técnicas de los diferentes sistemas de teledetección estudiados y sus limitaciones en cuando al estudio de parámetros que afectan a la estabilidad de taludes o laderas.

Método		Tipo de información	Resolución	Condiciones de operabilidad			Subsidencias	Inestabilidad taludes/laderas	Parámetros geomecánicos	Coste
				Vegetación	Meteorología adversa	Mala iluminación				
INSAR	Satelital	Mapa Píxeles	dam-m	Media	Bueno	Bueno	Si	Si	✗	Bajo-Alto
	Avanzado	Mapa Píxeles + Serie temporal	dam-m	Media	Bueno	Bueno	Si	Si	✗	Bajo-Alto
	Terrestre		cm-m	Media	Bueno	Bueno	Si	Si	✗	Medio-Alto
LiDAR	Aéreo	Nube de Puntos	m	Media	Medio-Bajo	Bueno-Medio	Si	Si	✗	Medio-Alto
	Terrestre		mm	Media	Medio-Bajo	Bueno-Medio	Si	Si	Si	Medio
	Barco/tren/coche		cm	Media	Medio-Bajo	Bueno-Medio	✗	Si	Si	Medio-Alto
	UAV		cm	Media	Medio-Bajo	Bueno-Medio	Si	Si	Si	Medio-Alto
Fotogrametría	Convencional terrestre		mm-cm	✗	Bajo-imposible	✗	✗	Si	Si	Bajo-Medio
	Convencional Aérea		dm-m	✗	Bajo/imposible	✗	Si	Si	Si	Medio-Alto
	SfM Terrestre		mm-cm	✗	Bajo/imposible	✗	✗	Si	Si	Bajo
	SfM UAV		cm	✗	Bajo/imposible	✗	Si	Si	Si	Bajo-Medio

Tabla 27: Comparación de las diferentes técnicas de teledetección para la monitorización y caracterización de macizos rocosos. Fuente: Modificado de Tomás et al., 2014.

12.3.2. Sensores in situ

Teniendo en cuenta que el área de estudio que pretende abarcarse es muy extensa, la implementación de un sistema de monitorización mediante sensores instalados in situ requerirá un gran número de nodos a lo largo de la infraestructura. De esta forma, para que el sistema resulte técnica y económicamente viable es recomendable que los sensores utilizados cumplan ciertos requisitos que se enumeran a continuación:

- Coste relativamente bajo del sensor.
- Facilidad y bajo coste de instalación.
- Buena resistencia ante condiciones meteorológicas.
- Baja o nula necesidad de mantenimiento.
- Control de parámetros relativamente globales.
- Adquisición de datos totalmente automática y envío remoto.

Tal y como se ha desarrollado anteriormente, existe una extensa variedad de equipos de auscultación en función de las variables que deseen analizarse en el talud en cuestión. De esta forma, para realizar una elección de los sensores a instalar en cada

caso, generalmente resulta imprescindible la ejecución de un estudio inicial de cada caso concreto con el objetivo de determinar las variables más importantes a controlar.

De los sistemas de auscultación clásicos descritos con anterioridad, aquellos que generan una señal eléctrica tienen la posibilidad de ser monitorizados de forma automática, lo que permite el desarrollo de sistemas que registren los datos en tiempo real, e incluso tengan programado un sistema de alarma activada en el caso que se sobrepasen ciertos valores previamente identificados como valores límite de estabilidad.

En la *Tabla 28* se puede consultar una clasificación de los métodos de auscultación definidos anteriormente en función de la posibilidad de automatización completa del proceso de adquisición de los datos y su transmisión de forma remota.

TIPO DE MEDICIÓN	Automatizable	No automatizable
Movimiento de grietas/entre bloques	<ul style="list-style-type: none"> • Potenciómetro • LVDT • Cuerda vibrante • Extensómetro de cuerda 	<ul style="list-style-type: none"> • Cinta de convergencia • Cinta métrica • Calibre • Flexímetro
Movimientos en superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Topografía clásica* • GPS diferencial (DGPS)* • Inclínometro de pared 	
Desplazamientos profundos	<ul style="list-style-type: none"> • Inclínometro fijo • Extensómetro fijo • Reflectometría TDR • Extensómetro de inyección • Extensómetro de cable • Tiras de cortante 	<ul style="list-style-type: none"> • Sonda extensométrica • Sonda inclinométrica
Presiones intersticiales	<ul style="list-style-type: none"> • Piezómetro de cuerda vibrante • Piezómetro lápiz 	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería piezométrica ranurada • Piezómetro neumático • Piezómetro de resistencia eléctrica
Presiones y cargas	<ul style="list-style-type: none"> • Célula de presión total • Células de carga • Célula de inclusión rígida 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de presiometría

Tabla 28: Clasificación de los instrumentos de auscultación según la posibilidad de automatización del proceso de adquisición de datos y su transmisión de forma remota. () Instrumentos topográficos de toma de datos automatizables. Fuente: Propia.*

A diferencia del caso de las técnicas de teledetección, en el caso del diseño de una red de sensores instalados in situ para la monitorización de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria, no es necesario escoger un solo instrumento de auscultación, ya que este tipo de redes permite la implementación de diferentes sensores en función de los factores que requieran un control en cada caso concreto.

Tal y como se ha comentado, la monitorización de taludes mediante sensores instalados in situ será viable únicamente en taludes formados por suelos, donde las inestabilidades que puedan producirse afecten a una masa considerable del talud, ya que debido a la extensión de la zona de estudio, los movimientos o variaciones locales serán difícilmente localizables a no ser que se realice una instalación masiva de sensores en el terreno, una actuación que no resulta eficiente debido al coste de instalación y mantenimiento que implicaría.

Las inestabilidades de tipo global que pueden producirse en taludes en suelo son deslizamientos y vuelcos por colapso. Teniendo en cuenta este tipo de inestabilidades y el método de predicción de las mismas basado en el control de las presiones intersticiales, los sensores que serán considerados para la implementación del sistema de monitorización son:

- Piezómetro cerrado de cuerda vibrante.
- Inclínómetro inclinómetro.

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de monitorización mediante sensores en Cataluña es que existen numerosas zonas que quedan fuera del alcance de la cobertura de los enlaces de radio. Por lo tanto, en las zonas situadas fuera del alcance de señal, mediante la tecnología existente hoy en día en cuanto a sistemas de monitorización remota, no será posible la ejecución de la auscultación en tiempo real, ya que las puertas de enlace del sistema de sensores no serán capaces de enviar los datos recogidos al servidor. En la Figura 76 puede observarse un mapa de Cataluña con las áreas sin cobertura representadas en negro, tal como puede observarse, la línea Lleida - La Pobla de FGC atraviesa numerosas zonas "ciegas".

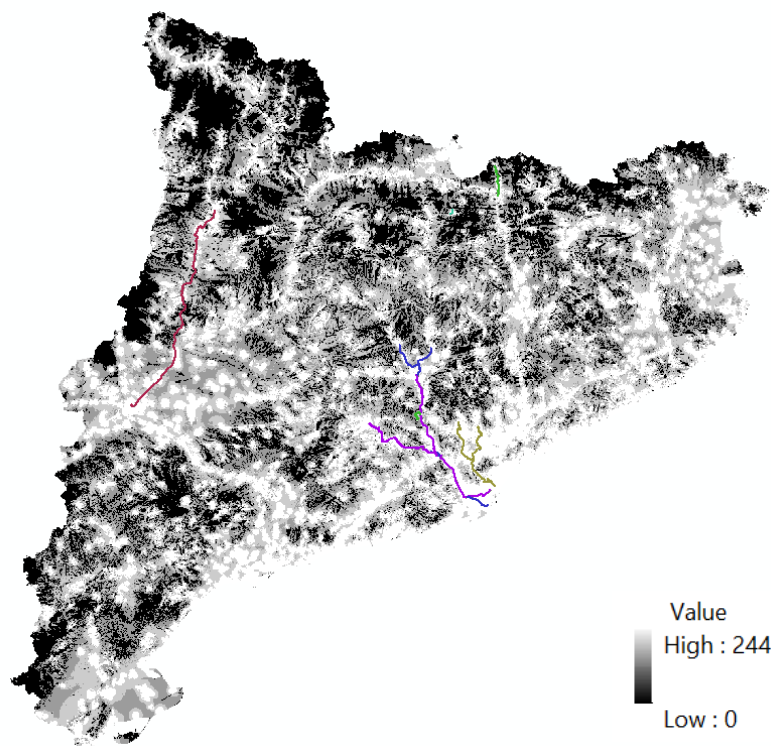


Figura 76: Mapa de cobertura en Cataluña junto con las líneas ferroviarias de FGC. Fuente: Propia.

12.4. Análisis económico de los diferentes métodos

El factor económico es uno de los aspectos más relevantes para una determinada empresa o entidad que esté pensando en realizar cualquier innovación o cambio en las actividades que desarrolla. Hay que tener en cuenta que el precio de venta de algunos de estos equipos, junto con el coste de licencias de los programas informáticos de

tratamiento de datos requeridos, pueden alcanzar cifras económicas que algunas entidades no pueden asumir o que, debido al uso que vayan a dar al equipo y los requerimientos de mantenimiento que estos necesiten, puede resultar más económico y eficiente contratar una empresa externa que posea el equipo y el personal necesario para realizar el estudio en cuestión.

Por estos motivos, a parte de la viabilidad técnica de cada método de monitorización, es imprescindible analizar el coste económico que conlleva cada uno de ellos, con el objetivo de seleccionar la metodología más eficiente tanto técnica como económicamente.

Resulta complicado determinar un coste de ejecución y tratamiento de los datos necesarios, ya que el coste final de aplicación de cada metodología puede resultar muy variable en función de diversos factores tales como características y extensión del área de estudio, costes de programas de análisis de datos, tipo de acuerdo que se llegue con la empresa que vaya a ejecutar el estudio, etc.

A continuación, se muestra un estudio económico del coste de ejecución del estudio y tratamiento de los datos mediante algunas de las técnicas estudiadas. Es necesario recalcar que no se trata de un presupuesto concluyente ya que, al no existir un proyecto previo de características similares, resulta complejo obtener las cifras exactas de todos los costes desglosados debido a la cantidad de factores que pueden influir en el presupuesto. De esta forma, el objetivo de este estudio ha sido encontrar una cifra aproximada del coste de ejecución de cada técnica con el fin de considerar las metodologías más eficientes tanto técnica como económicamente.

12.4.1. Comparativa económica de técnicas de teledetección

El análisis técnico de los diferentes métodos ha permitido descartar el uso del sistema de teledetección RADAR por lo que, en este apartado el estudio económico se centrará en las técnicas LiDAR y fotogrametría debido a su mayor viabilidad de aplicación técnica al caso de estudio.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la forma de ejecución de cada metodología, es decir, la plataforma utilizada para la adquisición de datos que, aparte de influir en la resolución y precisión de la información obtenida, puede tener también una gran influencia en el coste final de ejecución.

Debido a la extensión de la zona de estudio, será necesario considerar plataformas móviles, terrestres o aéreas para la ejecución de la adquisición de los datos, ya que su obtención a pie o mediante plataforma fija no resultaría eficiente o económica.

Una de las mayores dificultades, en el caso de las técnicas de teledetección, es la estimación de los costes de análisis y gestión de los datos, ya que existen infinidad de programas informáticos disponibles para ello. Debido a que todas las técnicas de teledetección consideradas ofrecen como resultado nubes de puntos de los escenarios estudiados, se ha aproximado un coste fijo de 60.000 €/anuales en concepto de tratamiento de datos para todas las técnicas de teledetección, basado en los precios de mercado de licencias de este tipo de programas informáticos.

Finalmente, hay que tener en cuenta que, mediante las técnicas de teledetección disponibles en la actualidad, no es posible llevar a cabo una monitorización en tiempo real, por lo que es preciso determinar una frecuencia de monitorización en función del riesgo existente en cada zona.

Para determinar la frecuencia de monitorización necesaria en cada caso, es necesario realizar una primera auscultación de referencia con el fin de determinar el estado de los taludes. Otra opción más económica puede ser utilizar la información de las matrices de riesgo contenida en las fichas inventario de FGC.

Sin embargo, al tratarse de un primer estudio aproximado y, debido a la limitación en medios y acceso a la información completa, para la realización de esta aproximación económica y en función de la frecuencia de los cambios estacionales medios, se considerará una frecuencia de monitorización de 4 inspecciones anuales para ambas líneas.

- **Láser Scanner (LiDAR)**

Una de las grandes ventajas del sistema LiDAR es la posibilidad de adquisición de datos desde plataforma móvil terrestre, que permite la toma de datos desde un vehículo en movimiento. De esta forma, para el estudio de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria, la posibilidad de utilizar el propio tren como plataforma de adquisición de datos (Train-borne LiDAR) permite el uso de una plataforma móvil, con una trayectoria perfectamente definida, que facilitará en gran medida el tratamiento posterior de los datos.

El LiDAR sobre plataforma móvil terrestre es capaz de tomar datos sobre vehículos en movimiento con una velocidad de hasta 100 km/h sin provocar huecos en la nube de puntos. Consecuentemente, en el caso de aplicación considerado, no sería necesaria la toma de medidas extraordinarias, ya que la velocidad máxima nominal de la unidad de tren que opera en las líneas de FGC es de 90 km/h, en recta horizontal con carga máxima, aunque la mayoría de los trenes circulan a velocidades inferiores. Por otro lado, los trenes realizan varios recorridos diarios a través de cada línea por lo que, en una única jornada sería posible obtener una nube de puntos representativa de los taludes y estructuras existentes a ambos lados de la vía, sin que la plataforma de toma de datos suponga un coste económico a añadir en equipamiento.

Hay que tener en cuenta que, para la implementación de esta técnica, es necesario la realización de una serie de trabajos de campo y gabinete iniciales con el objetivo de generar una base de apoyo a las lecturas tomadas por el láser scanner. La base de apoyo necesaria consiste en el cálculo de las coordenadas de base GNSS de puntos de control mediante el método cinemático en tiempo real (RTK) con el objetivo de obtener las coordenadas de la trayectoria del vehículo y posteriormente ajustar los datos obtenidos mediante el equipo LiDAR.

La *Tabla 29* muestra un cálculo del coste de ejecución por contrata para el primer año de implementación de la técnica train-borne LiDAR para la monitorización de las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobl. El cálculo del presupuesto de ejecución para el primer año de aplicación de la técnica se ha desglosado en dos

partes, primero se han calculado los costes iniciales de ejecución de una toma de datos base y seguidamente los costes generales de adquisición de datos mediante el equipo LiDAR. Para los cálculos se han considerado los siguientes factores:

- Rendimiento toma de datos base: 5 km/jornada.
- Rendimiento toma de datos LiDAR: 1 línea ferroviaria/día.
- Líneas ferroviarias a estudiar: 2 líneas.
- Frecuencia de monitorización: 4 inspecciones/año.
- Nº de jornadas de toma de datos = 8 jornadas/año.
- Costes parciales= 15% de los costes generales.

	Precio (€)	Unidades	Coste (€)
Levantamiento GNSS-RTK			
Alquiler Receptor Topcon Hiper SR + Controladora FC-500	100	30	3000
Ingeniero técnico en topografía	100	30	3000
Medición con base de apoyo a Mobile Mapping			
Alquiler Receptor GR-5	100	30	3000
Ingeniero técnico en topografía	100	30	3000
Coste inicial general			12000
Coste parcial	0,15	12000	1800
Coste inicial de ejecución por contrata			13 800,00
Medición con equipo Mobile Mapping IP-S3			
Alquiler equipo TopCon IP-S3	2500	8	20000
Ingeniero técnico en topografía	100	8	800
Costes software y gestión de datos	60000	1	60000
Coste anual general			80 800,00
Coste parcial	0,15	80800	12120
Coste anual de ejecución por contrata			92920
Coste de ejecución por contrata primer año			106 720,00 €

Tabla 29: Coste de ejecución por contrata de monitorización mediante la técnica Train-borne LiDAR en el primer año de ejecución en las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobla de FGC. Fuente: Propia.

• Fotogrametría

En el caso de la fotogrametría, las técnicas más eficientes para la monitorización de infraestructuras ferroviarias son la fotogrametría aérea desde avioneta o helicóptero y la fotogrametría en su variante SfM desde UAV. Tal y como se ha comentado, cada caso tiene sus limitaciones y ventajas.

La fotogrametría aérea tiene un rendimiento mucho mayor pudiendo cubrir áreas de cientos de kilómetros, sin embargo, debido a la distancia de adquisición de datos la resolución disminuye considerablemente.

La fotogrametría ejecutada mediante UAV permite obtener resoluciones mucho mejores al poder realizar la toma de los datos a distancias cortas del objetivo, sin embargo, pese a que supone un mayor rendimiento comparado con las técnicas clásicas de auscultación, debido a las limitaciones de tiempo de vuelo y las

restricciones legales existentes en cuanto a la distancia entre piloto y la aeronave, su rendimiento es notablemente menor que la fotogrametría aérea.

A continuación, se muestra una aproximación del coste de adquisición de las nubes de puntos correspondientes a las dos líneas de estudio, considerando los precios de mercado de servicio de adquisición de datos ofrecido por empresas especializadas en topografía aérea mediante UAV y mediante avioneta. En los costes no se han considerado posibles sobrecargos debido al traslado de los operarios que ejecuten el servicio.

- Fotogrametría UAV

La *Tabla 30* muestra un cálculo del coste de ejecución por contrata para la aplicación de la fotogrametría en su variante SfM sobre UAV para la monitorización de las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobl. Para el cálculo del rendimiento de adquisición de datos se ha tenido en cuenta una jornada de 8 trabajo, 15 minutos de vuelo por talud y 4 horas de preparación y recogida del equipo junto con desplazamiento de los operarios a lo largo del área de estudio.

- Rendimiento adquisición de datos: 15 taludes/jornada.
- Nº de taludes a estudiar: 269.
- Taludes Barcelona-Vallés: 77
- Taludes Lleida-La Pobl: 192
- Frecuencia de monitorización: 4 veces/año.
- Nº de jornadas de adquisición de datos = 71,46 jornadas.

	Precio (€)	Unidades	Coste (€)
Servicio adquisición de datos	1500	72	108000
Servicio gestión y análisis de datos	60000	1	60000
Costes generales			168 000,00
Costes parciales	0,15	168000	25200
Coste de ejecución por contrata			193 200,00 €

Tabla 30: Coste de ejecución por contrata de monitorización mediante topografía SfM sobre UAV en las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobl de FGC. Fuente: Propia.

- Fotogrametría desde avioneta

La *Tabla 31* muestra un cálculo del coste de ejecución por contrata para la aplicación de la fotogrametría clásica desde avioneta para la monitorización de las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Pobl. Para el cálculo del rendimiento se ha tenido en cuenta la velocidad media de una avioneta, el tiempo de llegada de la avioneta al lugar específico y que ésta debe volar lento y bajo, realizando varias pasadas con el objetivo de obtener todas las imágenes necesarias de los taludes y estructuras a ambos lados de las vías.

- Rendimiento: 300 km/jornada.
- Línea B-V: 57,03 km.
- Línea LI-P: 89,1 km.
- Distancia V-LI: 115,2 km.
- Distancia total: 261,33 km.

- Frecuencia de monitorización: 4 veces/año.
- Nº de jornadas necesarias= 4 jornadas.

	Precio (€)	Unidades	Coste (€)
Costes fijos levantamiento de avioneta	10000	4	40000
Día de vuelo avioneta	6000	4	24000
Servicio gestión y análisis de datos	60000	1	60000
Costes generales			124000
Costes parciales	0,15	124000	18600
Coste de ejecución por contrata			142 600,00 €

Tabla 31: Coste de ejecución por contrata de monitorización mediante topografía clásica sobre avioneta en las líneas ferroviarias Barcelona-Vallés y Lleida-La Poble de FGC. Fuente: Propia.

12.4.2. Sensores instalados in situ

Para la ejecución de esta primera aproximación al estudio económico se considerará la instalación de una red regular y equidistante de sensores sin tener en cuenta las características específicas de cada talud. Este estudio se realizará considerando la instalación de piezómetros e inclinómetros.

La red de dispositivos puede alcanzar rangos de comunicación de varios kilómetros entre nodos, uno de los sistemas más altos del mercado alcanza distancias de 15 km, por lo que se considerará una puerta de enlace de datos cada 10 km y dos inclinómetros, dos piezómetros y dos lectores de datos (los lectores de datos son diferentes para los inclinómetros y piezómetros) por cada talud en suelo.

En la *Tabla 32* puede consultarse una aproximación de la cantidad de elementos necesarios para llevar a cabo la monitorización inalámbrica en las líneas ferroviarias Barcelona – Vallés y Lleida – La Poble.

Línea	Longitud (km)	Taludes en suelo	Puerta de enlace	Lector de datos	Inclinómetros	Piezómetros
Barcelona – Vallés	57,03	48	6	96	96	96
Lleida – La Poble	89,1	100	9	200	200	200

Tabla 32: Contabilización de la instrumentación necesaria para llevar a cabo un sistema de monitorización inalámbrico. Fuente: Propia.

Finalmente, en función del precio de la instrumentación y la cantidad de elementos necesarios, es posible el cálculo aproximado del presupuesto de implementación de una red inalámbrica de monitorización de taludes en suelo mediante la instalación de piezómetros e inclinómetros, en las líneas ferroviarias Barcelona – Vallés y Lleida – La Poble. El cálculo se ha dividido en dos partes, una parte correspondiente a los costes de compra e instalación del equipo y otra parte correspondiente a los gastos de mantenimiento y gestión de los datos obtenidos. Para los costes de mantenimiento se ha considerado la revisión del estado de los sensores una vez al mes por parte de un ingeniero técnico en topografía y un coste de imprevistos para cubrir la posibilidad de reparaciones en el sistema.

En la *Tabla 33* puede consultarse el cálculo desglosado de los precios y el resultado del presupuesto calculado.

EQUIPOS E INSTALACIÓN	PRECIO (€)	UNIDADES	COSTE (€)
Gateway Loadsensing G6. Radio de largo alcance. Sub-1 GHz. Incluye software basado en web de configuración y acceso a datos LS.	2475	15	37125
Datalogger inalámbrico LS G6 de cinco canales VW. Sub-1 GHz.	898	148	132904
Datalogger inalámbrico LS G6 de cinco canales DIG. Sub-1GHz.	898	148	132904
Batería Saft LSH 14 tamaño para LS-G6 datalogger.	15	296	4440
Soporte externo para pared (set de 2)	16	156	2496
Cable Datalogger-móvil	20	10	200
Digital Bus Vertical In-place MEMS Inclinómetro System	600	296	177600
Piezómetro de Cuerda vibrante. VW Piezo	500	296	148000
EJECUCIÓN DE SONDEOS E INSTALACIÓN DE TUBERÍAS INCLINOMÉTRICAS			
Desplazamiento y retirada de equipo a obra	600	148	88800
Emplazamiento de equipo en el punto	45	592	26640
Perforación de 10 m de profundidad con testigo continuo en cualquier tipo de material, incluyendo parte proporcional de suministro de agua, cajas de sondeo y revestimiento si precisa	66	592	39072
Tubería inclinométrica de 10 m de aluminio de 2.5", incluidos manguitos de conexión, tapones de fondo y cierre, instalado en sondeo incluyendo inyección de lechada y bentonita	22	296	6512
Arqueta metálica de protección instalada	110	596	65560
Jornada de ingeniero técnico de topografía para la realización de la lectura 0 de referencia	100	50	5000
Costes iniciales generales			867253
Costes parciales	0,15	867253	130087,95
Coste inicial de ejecución por contrata			997 340,95 €
EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO			
Ingeniero técnico en topografía	400	24	9600
Gestión de datos	20000	1	20000
Costes asociados a imprevistos y mantenimiento de equipos	5000	1	5000
Costes anuales generales			34600
Costes parciales	0,15	34600	5190
Coste anual de ejecución por contrata			39790
Coste del primer año de ejecución por contrata			1 037 130,95 €

Tabla 33: Cálculo del presupuesto aproximado de instalación de red de monitorización remota mediante inclinómetros y piezómetros en las líneas ferroviarias Barcelona – Vallés y Lleida – La Pobl.

Fuente: Propia.

12.4.3. Análisis de los resultados

En la *Tabla 34* pueden consultarse los resultados del análisis económico comparativo del del coste anual de adquisición de datos, considerando el estudio de las líneas ferroviarias Barcelona – Vallés y Lleida – La Pobra, con una frecuencia de monitorización de 4 inspecciones anuales junto con la resolución de las nubes de puntos obtenidas mediante las técnicas fotogrametría y LiDAR.

TÉCNICA	PLATAFORMA	JORNADAS	COSTE (€)	RESOLUCIÓN
LiDAR	Train-borne	8	106.720	cm
Fotogrametría	Avioneta	4	142.600	dm-m
	UAV	72	193.200	cm

Tabla 34: Tabla comparativa del coste anual de adquisición de datos junto con la resolución de los resultados obtenidos mediante fotogrametría y LiDAR considerando las líneas Barcelona - Vallés y Lleida - La Pobra con una frecuencia de monitorización de 4 inspecciones anuales. Fuente: Propia.

A raíz de los resultados, puede afirmarse que la técnica de teledetección más eficiente para la monitorización de los taludes de la infraestructura ferroviaria es el sistema láser scanner utilizando como plataforma de adquisición de datos el propio tren. Incluso teniendo en cuenta el coste de adquisición inicial de datos, la técnica Train-borne LiDAR ha demostrado un coste de adquisición de datos notablemente menor que el resto de las técnicas con mejor resolución en la nube de datos obtenida.

Por otro lado, el resultado obtenido en el cálculo del presupuesto de ejecución por contrata para el primer año de implementación de una red de sensores para la monitorización remota de los taludes en suelo de las líneas estudiadas resulta más de 10 veces mayor que el precio obtenido para el estudio de la infraestructura completa mediante el sistema Train-borne LiDAR.

Hay que tener en cuenta que los costes calculados corresponden a la inversión del primer año, y que el coste de instalación de la red de sensores resulta mucho mayor que el coste de preparación para el desarrollo de un estudio mediante LiDAR mientras que los costes anuales resultan menores en el caso de los sensores instalados in situ.

En la *Tabla 35* se puede consultar un estudio de la amortización anual en 10 años de ambas técnicas y el desglosado en función de la inversión inicial de implementación y los costes anuales debido a adquisición de datos, mantenimiento, personal y gestión de datos.

SISTEMA	INVERSIÓN INICIAL	COSTE ANUAL	AMORTIZACIÓN ANUAL EN 10 AÑOS
Sensores in situ	997 340,95 €	39 790,00 €	139 524,10 €
Train-borne LiDAR	13 800,00 €	92 920,00 €	94 300,00 €

Tabla 35: Desglosado de costes de monitorización mediante sensores instalados in situ y Train-Borne Lidar en función del coste inicial de implementación y el coste anual de ejecución y cálculo de la amortización anual en 10 años.

Tal como puede observarse, la contratación del servicio de monitorización de la infraestructura ferroviaria mediante el equipo Train-borne LiDAR, además de proporcionar una cobertura mucho más completa que el sistema de monitorización mediante sensores considerado, resulta más económico tanto en la inversión en el primer año como en la amortización anual después de 10 años de ejecución.

13. CONCLUSIONES

En este último capítulo, se resumen las conclusiones extraídas del presente trabajo a través del análisis técnico de los diferentes métodos de auscultación de taludes y los estudios de viabilidad económica realizados.

1. Los estudios técnicos y económicos realizados han demostrado que el método más eficiente para la realización de una monitorización de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria en Cataluña es la técnica láser scanner ejecutando la toma de datos con el dispositivo instalado sobre el mismo tren (Train-borne LiDAR). Debe tenerse en cuenta que los estudios de viabilidad técnica y económica se han realizado en función de las características de la infraestructura ferroviaria en Cataluña, no tiene porqué ser la mejor opción para otros escenarios de aplicación.
2. La técnica Train-borne LiDAR permite la obtención de una nube de puntos del área escaneada, incluso en condiciones de baja iluminación con una resolución centimétrica. A partir de esta información, utilizando programas informáticos de tratamiento de nubes de puntos, es posible extraer una gran cantidad de información para la realización de estudios de conservación sobre la infraestructura ferroviaria.
3. En relación a la monitorización de taludes en infraestructuras ferroviarias, la técnica Train-borne LiDAR permite:
 - Obtención de parámetros geomecánicos.
 - Localización de presencia de agua.
 - Detección de movimientos o cambios.
 - Detección de signos de erosión en el talud.
 - Detección de bloques de roca desprendidos.
 - Control del estado de las actuaciones en los taludes tales como material acumulado en las mallas de contención, roturas en las mismas, material acumulado en cunetas, patologías en hormigón proyectado, etc.
4. Las posibilidades de implementación de esta técnica no son aplicables únicamente al control de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria, otras posibles aplicaciones del uso del Train-borne LiDAR son:
 - Inspección del estado de túneles y otras estructuras.
 - Inspección del estado de los cables de catenaria.
 - Control de crecimiento de vegetación que pueda invadir la zona de seguridad de la infraestructura.
 - Control del estado de las señales ferroviarias.
5. Debe tenerse en consideración que este método implica un estudio esencialmente fenomenológico, ya que está basado en el control de los cambios producidos en los taludes que puedan desencadenar inestabilidades y no considera los posibles factores desencadenantes de las mismas.

6. El control de movimientos ejecutado mediante la técnica Train-borne LiDAR se basa en la medición relativa de los puntos observados respecto a la posición del sensor. Debido a que el LiDAR va instalado a bordo del propio tren, esta técnica no permitirá el control de posibles hundimientos o deslizamientos en los casos en los que la infraestructura ferroviaria haya sido construida sobre un terraplén.
7. La implementación de una red de sensores para la monitorización remota de los taludes colindantes a la infraestructura ha sido considerada económicamente inviable debido a que su aplicación para el estudio de un área tan extensa y heterogénea, como resulta la infraestructura ferroviaria de Cataluña, implicaría una enorme inversión económica en adquisición e instalación de instrumentación. Sin embargo, su aplicación en escenarios concretos de características conocidas, que impliquen un riesgo potencial para la infraestructura, puede resultar viable al optimizar la instrumentación necesaria para el control de las posibles inestabilidades.

De esta forma, no se debe desechar la posibilidad de utilizar el sistema de monitorización mediante sensores como un complemento al estudio mediante la técnica Train-borne LiDAR. La implementación de una red de sensores de control remoto, en aquellos escenarios en los que existan limitaciones para la aplicación de la técnica LiDAR, tal como es el caso del control de hundimientos o deslizamientos en terraplenes, permitirá un control global de la infraestructura ferroviaria sin suponer una inversión económica desorbitada.

14. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto consiste en un estudio de investigación basado en consultas bibliográficas e información facilitada por diversas entidades junto con el conocimiento y la experiencia propia en el ámbito de conservación de infraestructuras ferroviarias, sin embargo, las conclusiones extraídas no se sustentan mediante ensayos o pruebas ejecutadas en la práctica.

De esta forma, este trabajo constituye una base para futuras investigaciones y estudios de aplicabilidad de las metodologías expuestas.

Algunas de las posibles líneas de investigación a desarrollar son las siguientes:

- Comprobación de la aplicabilidad de la metodología Train-borne LiDAR para la monitorización de los taludes colindantes a la infraestructura ferroviaria en Cataluña y determinar sus limitaciones reales.
- Profundizar en la posibilidad de control del estado total de la infraestructura mediante la misma técnica. Es decir, control los cables de catenaria, geometría de la vía, estructuras, etc.
- Profundizar en los métodos de gestión automática de nubes de puntos con el objetivo de desarrollar un sistema de monitorización totalmente automatizado.

- Generación u obtención de una base de datos completa de las características específicas de cada talud o terraplén existentes en la infraestructura ferroviaria de Cataluña.
- Estudiar la viabilidad económica de implementación de una red de sensores en terraplenes que sustenten la infraestructura y en el resto de las limitaciones identificadas para la técnica Train-borne LiDAR.
- Motivar a las ingenierías que actualmente se encargan de la inspección y redacción de proyectos de estabilización de taludes, para que implementen en sus técnicas el análisis de nubes de puntos y monitorización remota.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., (2002). "Ingeniería Geológica". Pearson Educación, 9, 432-439 pp.
- [2] Suárez, J., (2012). "Libro de deslizamientos". Erosion.com.co. Vol. II, 10, 314-330 pp.
- [3] Matherson ,G.D., (1983). "Rock Stability assessment in preliminary site investigations – graphical methods". Department of the environment, Department of Transport TRL Report LR 1039. TRL, Crowthorne, Berks.
- [4] Markland, J. T., (1972). "A useful technique for stimating the stability of rock slopes when the rigid wedge type of failure is expected". Imperial College Rock Mechanics Research Report. No. 19, 10 pp.
- [5] Hoek ,E., (1986). "Rockfall: a computer program for predicting rockfall trajectories". Unpublished internal notes, Golder Associates, Vancouver.
- [6] Priest, S.D. (1985)., "Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics". George Allen & Unwin, London, 124 pp.
- [7] Hoek E., Bray J.W., (1981). "Rock slope engineering". The Institution of Mining and Metalurgy, London, 358 pp.
- [8] Caine, N., (1982). "Toppling failures from Alpine cliffs on Ben Lomond, Tasmania. Earth Surface Processes and Landforms", 2,133-152 pp.
- [9] Holmes, G., Jarvis, J.J., (1985). "Large-scale toppling within a sackung type deformation at Ben Arrow, Scotland". Q. J. Eng. Geol., 18, 287-289 pp.
- [10] Goodman, R.E., Bray, J., (1976). "Toppling of rock slopes". ASCE, Proc. Specialty Conf. on Rock Eng. for Foundations and Slopes, Boulder, CO, 2, 201-34 pp.
- [11] Wyllie D.C., Mah C.W., (2004). "Rock Slope Engineering". Spon Press, London. 318-319 pp.
- [12] Giraud, A., Rochet, L., Antoine, P., (1990). "Processes of slope failure in crystallophyllian formations" Engineering Geology, 29, 241-253pp.
- [13] Voight, B., (1979). "Rockslides and Avalanches". Elsevier, Amsterdam.
- [14] Hutchinson, J.N., (1988). "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". Proc. Fifth Int. Symp. Landslides, Lausanne.
- [15] Bieniawski, Z. T., (1989). "Engineering rock mass classifications". John Wiley and Sons, Inc.
- [16] Romana, M. (1985). "New adjustment ratings for application of BIENIAWSKI classification to slopes". Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas. 49-53 pp.
- [17] Romana, M. (1993). "A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating". J.Hudson. Comprehensive Rock Engineering. Pergamon, 3, 575-600 pp.

- [18] Alonso, E., (1997). "Riesgos geológicos Asociados a las avenidas y su previsión". In: L. Berga y J. Dolz (Editores): Avenidas. Sistemas de previsión mediante un Sistema de Información Geográfica". III Simposio Nacional Taludes y Laderas Inestables. La Coruña, 1, 121-133 pp.
- [19] Skempton, A. W., (1964). "Long term stability of clay slopes". Geotechnique, 14, 75-105 pp.
- [20] Voight, B., Kennedy, B. A., (1979). " Slope failure of 1967-1969, Chuquicamata mine, Chile" In B. Voight (Ed.) Rockslides and avalanches, 2, 595-632 pp.
- [21] Rat, M., (1988). "Essai de prevision de la date de rupture d'un grand glissement". II Simp. Sobre Taludes y Laderas Inestables, Andorra la Vella, 419-431 pp.
- [22] Saito, M., (1965). "Forecasting time of occurrence of a slope failure" Proc. 6th ICSMFE, Montreal, 2, 537-541 pp.
- [23] Fukuzono, M. J., and Terashima, H., (1985). "Experimental study of slope failure in cohesive soils caused by rainfall". Proc. Int Symp. Erosion, Debris Flows and Disaster Prevention Tsukuba. Japan, 347-350 pp.
- [24] Voight, B., (1989). "Materials science law applied to time forecast of slope failure". Landslide News, 3, 8-11 pp.
- [25] Onodera, T., Yoshinaka, R., Kazama, H., (1974). "Slope failures caused by heavy eainfall in Japan". Proc. 2nd Int. Congr. IAEG. Sao Paulo, 11, 1-10 pp.
- [26] Lumb, P., (1975). "Slope failures in Hong Kong". Q. Jour. Eng. Geol., 8, 31-65 pp.
- [27] Romana, M., (1992). "El problema de la previsión de la rotura en un talud en función de la pluviometria". III Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, La Coruña, 1, 53-69 pp.
- [28] Moya, J., Corominas, J., Gutiérrez, E., Villaplana, L.M., (1992). "Datación de movimientos de ladera mediante la dendrocronologia Ejemplos de aplicación en el Pirineo Oriental". III Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, La Coruña, 1, 27-38 pp.
- [29] Oyagi, N., (1984). "Lansdslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: a State-of-the art report". 4th Int. Symp. On Landslides, Toronto, 3, 1-31.
- [30] Innes, J. L., (1983). "Lichenometric dating of debris flow deposits in the Scottish Highlands" Earth Surf. Proces and Landforms, 8, 579-588 pp.
- [31] Hupp, C. P., (1983). "Geobotanical evidence of late Quaternary mass wasting in block field areas of Virginia". Earth Surf. Proces. and Landforms, 8, 439-450 pp.
- [32] Puertos del Estado. "Sistema GPS/DGPS". Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
<http://www.puertos.es/es-es/conceptosgenerales/Paginas/Sistema-GPSDGPS.aspx>

- [33] Galan. D., Martinez Marin. R., Marchamalo. M., Sanchez Sobrino. J. A., (2011) "Control de movimientos en preses mediante DGPS. Aplicación a la presa de la Acena (España). Tecnología y Ciencias del Agua. II, 3.
- [34] Leica Geosystems. <http://www.leica-geosystems.es/>;
http://www.leicageosystems.es/es/Auscultacionen_1690.htm; <http://www.leica-si.com/auscultacion.asp>.
- [35] Cornforth, D. H., (2005). "Landslides in practice Investigation Analysis and Remedial/Preventative Options in Soils". John Wiley & Sons, inc. Honoken, New Jersey, 595 pp.
- [36] Gili Ripoll J.A., (2003). "Instrumentación para control de movimientos de ladera: sistema GPS y otros". En: Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos. IGME. Madrid, España.
- [37] Tsang, C. M., England, G. L.. (1995). "Potential os Fibre Optic Sensing in Geotechnical Applications". Geotechnical News, December.
- [38] Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M., (2002). "Slope stability and stabilization methods". John Wiley & Sons, Inc. New York. 712 pp.
- [38] Tomás, R., Romero, R., Mulas, J., Marturià, J.J., Mallorquí, J.J., Lopez-Sanchez, J.M., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P.J., Fernández, J., Duque, S., Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco, D., Blanco, P., (2014). "Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain". Environmental Earth Sciences, 71, 163-181 pp.
- [39] Hanssen, R.F., (2001). "Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis". Springer.
- [40] Blanco-Sánchez, P., Mallorquí, J., Duque, S. & Monells, D. (2008). The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. In: Camacho, A., Díaz, J. & Fernández, J. (eds.) Earth Sciences and Mathematics. Birkhäuser Basel, 1167-1193 pp.
- [41] Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J. & Eineder, M. (2003). "ASAR ERS interferometric phase continuity". Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International, vol.1132. 1133-1135 pp.
- [42] Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry". Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions. 39, 8-20 pp.
- [43] Carrasco, D., Rodríguez, O., Díaz, J., Broquetas, A., (1997). "Interferometría RADAR para la obtención de Modelos Digitales del Terreno. Posibilidades y limitaciones". III Semana Geométrica de Barcelona. Abril 1997. 143-154 pp.
- [44] Pipia, L., Aguasca, A., Fabregas, X., Mallorquí, J.J., Lopez-Martinez, C. & Marturia, J., (2007). "Mining Induced Subsidence Monitoring in Urban Areas with a Ground-Based SAR". Urban Remote Sensing Joint Event, 2007, 1-5 pp.
- [45] Abellán, A., Vilaplana, J.M., Calvet, J., García-Sellés, D., Asensio, E., (2011). "Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basáltic rock face

at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 829-841 pp.

[46] Lim, M., Petley, D.N., Rosser, N.J., Allison, R.J., Long, A.J., Pybus, D., (2005). "Combines Digital Photogrammetry an Time-of-Flight Laser Scanning for Monitoring Cliff Evolution". *The Photogrammetric Record* 20, 109-129 pp.

[47] Delaunay, B., (1934). "Sur la sphere vide. A la mémoire de Georges Voronoi. *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matemamaticeskikh i Estestvennykn Nauk* (Bulletin of Academy os Science of the USSR). 7, 793-800 pp.

[48] Chen, Y., Medioni, G., (1992). "Object modelling by registration of multiple range images". *Image and Vision Computing*, 10, 145-155 pp.

[49] Feng, Q., Röshoff, K., (2015). "A Survey of 3D Laser Scanning Techniques for Application to Rock Mechanics and Rock Engineering". Ulusay, R. (ed.) *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*. 2007-2014 pp.

[50] Riquelme, A.J., (2015). "Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica". Universidad de Alicante.

[51] Gigli, G., Casagli, N., (2011). "Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 187-198 pp.

[52] Slob, S., (2010). "Automated rock mass characterization using 3D terrestrial laser scanner", Technical University of Delf.

[53] Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., (2015). "Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds". *Engineering Geology*, 195, 185-195 pp.

[54] Priest, S. D., Hudson, J. A., (1976). "Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*", 13, 135-148 pp.

[55] Palmstrom, A., (2005). "Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 362-377 pp.

[56] ISRM. (1981). "Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring". *ISRM Suggested methods*. Pergamon Press.

[57] Tse, R., Cruden, D. M., (1979). "Estimating joint roughness coeficients". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, 303-307 pp.

[58] Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., (2013). "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement". *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421-430 pp.

[59] Jover, R. T., (2016). "Monitorización y caracterización de macizos rocosos mediante técnicas remotes: làser escàner, fotogramtría e interferometria SAR". *Jornada Tècnica SEMR 2016*. 3-27 pp.

[60] Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., (2015). "Structure from motion (SFM) photogrammetry". Clarke, L.E. & Nield, J.M. (eds.) Geomorphological Techniques. British Society for Geomorphology, London.

[61] Hipermapa de la Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. <http://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html>

OTRAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft, L. L. C. (2016). "Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.2". http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_22n.pdf
- Brilakis, I., Fathi. H., Rashidi, A., (2011). "Progressive 3D re-construction of infrastructure with videogrammetry". Automation in Construction , 20, 884-895 pp.
- Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C. Y Luci, G. (2010). Monitoring, prediction and early warning using ground-based fotogrametry.
- Corominas; J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A. and Silvano, S., (2000). "Measurement of landslide displacements using a wire extensometer. Engineering Geology". 55, 149-166 pp.
- Dumnicliff, J., (1988). "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance" New York.
- Eberhardt E., (2007). "Structurally Controled Failure and Kinematic Admissibility". Geotechnical Engineering Practice and Design. Eosc 433.
- Gili, J.A. , Corominas, J., (2001). "Técnicas GPS para control de laderas". V Simp. Nac. sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid, Nov.2001, 1 37-48 pp.
- Gili, J.A., (2001). "Técnicas GPS para toma de datos en Hidrología Subterránea". Las caras del agua subterránea, Congreso en memoria de Germán Galarza, Barcelona, Septiembre de 2001, Medina y Carrera Eds. Publicación del IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, Nº 1/2001, II, 797-805 pp.
- Gili, J.A., J. Moya, J. Corominas, A. Lloret, (2002). "Measurement of Vallcebre landslide displacements using GPS, wire extensometers, inclinometers, EDM and terrestrial photogrammetry". 2nd Symp on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin, May 2002.
- Gili, J.A., Niñerola, D., López, A., (1997). "Algunos ejemplos de aplicaciones de precisión del sistema GPS en hidráulica y control de movimientos de ladera". Simposio III Semana Geomática, Barcelona, Abril 1997. 98-109 pp.
- Gili, J.A.; Corominas, J., Rius, J., (2000). "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring". Engineering Geology 55, 167-192 pp.
- Markland, J. T. (1972). "An useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge type of failure is expected". Imperial College Rock Mechanics Research Report. No. 19, 10 pp.

- Massonnet, D., (1997). "Interferometría de radar por Satélite". Investigación y Ciencia, 247 (Abril 1997), 14-21 pp.
- Mendoza López M.J., Domínguez Morales L., Noriega Rioja I., Guevara Ortiz E., (2002). "Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento". Informes Técnicos. CENAPRED. México.
- Mikkelsen, P.E., (1996). "Field instrumentation". Landslides investigation and mitigation. A.K.Turner and R.L.Schuster (Editors). T.R.B. Special Report 247. National Academy Press, Washington.D.C. 11, 278-316 pp.
- Riquelme, A.J., Tomás, R., Abellán, A., (2016). "Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 84, 165-176 pp.